



João Pedro Caniço Pombas

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

**Sistema robótico para seguimento solar CPV
baseado em processamento de imagem**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Miguel Murta Pina, FCT-UNL

Júri

Presidente: Professor Doutor André Damas Mora

Arguente: Professor Doutor João Almeida das Rosas

Vogal: Professor Doutor João Miguel Murta Pina

Setembro, 2016



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Sistema robótico para seguimento solar CPV baseado em processamento de imagem

Copyright © João Pedro Caniço Pombas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À memória de Miguel Vital, eterno melhor amigo...

*Que dado o infortúnio, foi impedido de concretizar o sonho de se formar em Engenharia
das energias renováveis.*

Agradecimentos

Neste capítulo pretendo expressar os meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização do curso e da presente dissertação.

Começo por agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Murta Pina, pela oportunidade de desenvolver esta dissertação, apoio e dedicação prestados. Pois mostrou sempre boa disposição nas reuniões, que permitiram alcançar o sucesso da mesma.

Quero agradecer também à minha família pelo apoio e motivação ao longo de toda a minha vida, que me tornaram na pessoa que sou e sem eles não teria alcançado decerto os objetivos atingidos até ao momento.

Agradeço também aos meus amigos, em especial à minha querida amiga Xana, pois se tem mostrado uma verdadeira amiga, estando presente nos bons e maus momentos, sendo um pilar fundamental na minha vida.

Não esquecendo os meus amigos mais chegados e restantes membros do NEEC, uma segunda família, pela amizade, dedicação e momentos bem passados que decerto não serão esquecidos, pois tornaram especiais estes cinco anos de faculdade.

Um agradecimento aos meus professores, em particular à professora Anikó pelo apoio ao longo destes anos e pela oportunidade para lecionar os turnos práticos de Sistemas Lógicos. Ao professor Luís Gomes pelas ocasiões em representação do curso e da FCT em diversos eventos como a Maker Faire, Futurália e Ciência Viva.

Não podendo deixar de referir a minha gratidão para com os meus afilhados Pacheco e Morais e não afilhados (oficialmente), Carreira, Gomes e Tomás, pelos momentos partilhados ao longo destes quatro anos, esperando que tenham sido brutais para vocês como foram para mim.

Por fim, mas não menos importante, gostava de agradecer aos caloiros e afilhados deste ano que me permitiram terminar este ciclo da melhor forma, marcando-o de forma muito positiva,

fazendo-me ainda concluir que esta grande aventura valeu muito a pena e passou mais rápido do que gostaria, resumindo-se nos melhores anos da minha vida.

A todos, o meu sentido e honesto,

Muito Obrigado!!!

Resumo

Dado o baixo rendimento de conversão das células fotovoltaicas, surgiram meios que permitiram aumentar a produção deste tipo de instalações, como o seguimento em um e em dois eixos, permitindo um aumento do aproveitamento solar ao longo do dia em cerca de 20% face às instalações estacionárias. Outra forma de aumentar o rendimento destas instalações, passa pelo aumento da irradiância na área de aproveitamento das células, como é o caso dos sistemas fotovoltaicos de concentração (CPV) com o uso de espelhos e lentes, visando o aumento da irradiância nestas.

Ao conjugar o seguimento solar com o fotovoltaico de concentração, é possível aumentar significativamente a produção das instalações. Porém, para maximizar o rendimento é necessário ter em consideração a otimização da instalação.

A presente dissertação consiste na construção de um seguidor solar de dois eixos, que permitirá encontrar a posição do Sol em tempo real, enviando-a posteriormente aos seguidores presentes num determinado parque, o que permite reduzir a energia despendida na deteção do vetor solar, além de assegurar a precisão necessária para este tipo de seguimento.

O seguidor solar tem como base duas estratégias de controlo distintas que se complementam, e que permitem o acompanhamento da trajetória solar em diversos cenários. Numa primeira instância recorre-se ao modelo analítico da posição aparente do Sol para orientação do robô, utilizando-se depois processamento de imagem para garantir uma maior precisão de seguimento.

Foi também desenvolvida uma aplicação informática que permite a gestão do seguidor solar de forma remota, armazenando os dados para posterior análise por parte do utilizador.

Palavras-chave: Fotovoltaico de concentração, Seguimento solar, Processamento de imagem, Robô de dois eixos.

Abstract

Considering the low efficiency of photovoltaic cells energy conversion, new approaches that allow increasing yield of this installation types emerged, like sun tracking with one or two axis, allowing the increase of solar harvest throughout the day in 20%. Another way to increase the yield of these installations would be increase useful area of cells, such as the case of concentrator photovoltaics (CPV) which use mirrors and lens to increase irradiance on cells.

Combining solar tracking with concentrator photovoltaics, allows increasing significantly the yield of this type of installation.

In this way, the solution proposed in this thesis consists in the development of a solar tracker with two axes to find the solar orientation in real time, sending it later to trackers in the photovoltaic park. This reduces the energy spent in the detection of the solar vector, while still ensuring the accuracy required for this type of tracking.

The developed solar tracker is based on two different control strategies that complement each other, allowing tracking of the solar trajectory in various scenarios. In the first instance it uses an analytical model to determine the apparent position of the sun to guide the robot, using then image processing to ensure more accurate tracking.

A computer application was developed allowing operating the solar tracker remotely and storing the data for later analysis by the user.

Keywords: Concentrator photovoltaics, Solar tracking, Image processing, two axis robot.

Índice Geral

ACRÓNIMOS	XVII
SIMBOLOGIA.....	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 FOTOVOLTAICO DE CONCENTRAÇÃO (CPV).....	5
2.2 SEGUIDORES SOLARES.....	7
2.3 MÉTODOS DE SEGUIMENTO SOLAR	9
2.3.1 <i>Seguimento baseado em equações matemáticas.....</i>	<i>10</i>
2.3.2 <i>Seguimento com recurso a eletrónica fotossensível</i>	<i>14</i>
2.3.3 <i>Seguimento baseado em processamento de imagem</i>	<i>19</i>
2.4 EXEMPLO: PARQUE SOLAR DA GLINTT ENERGY	22
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
3 SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR: METODOLOGIA.....	25
3.1 MODELO ANALÍTICO DA POSIÇÃO APARENTE DO SOL.....	25
3.2 IDENTIFICAÇÃO DO SOL NUMA IMAGEM	29
3.3 SÍNTESE	31
4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR.....	33
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	33
4.2 MODELO ANALÍTICO DA ORIENTAÇÃO SOLAR	34
4.2.1 <i>Aquisição de dados</i>	<i>35</i>
4.2.2 <i>Implementação do modelo analítico da orientação solar</i>	<i>37</i>
4.3 MODELO BASEADO EM PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	37

4.3.1	<i>Aquisição de imagem</i>	37
4.3.2	<i>Identificação do Sol numa imagem</i>	39
4.4	IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA.....	40
4.5	CONTROLADOR	43
4.6	APLICAÇÃO INFORMÁTICA	49
4.7	CONCLUSÕES	53
5	PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS	55
5.1	CALIBRAÇÃO	55
5.2	CONVERSÃO ENTRE NÚMERO DE PÍXEIS E ÂNGULO	56
5.2.1	<i>Método A - Deslocamento do foco luminoso</i>	56
5.2.2	<i>Método B - Deslocamento da câmara</i>	60
5.2.3	<i>Comparação de métodos</i>	64
5.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	65
6	CONCLUSÕES	75
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.2	TRABALHO FUTURO	77
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS	83
	CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES IMPLEMENTADOS	83

Índice de Figuras

2.1: COMPARAÇÃO ENTRE FOTOVOLTAICO (ESQUERDA) E CPV (DIREITA)	6
2.2: IMPORTÂNCIA DO ÂNGULO DE ACEITAÇÃO EM SISTEMAS DE ELEVADA CONCENTRAÇÃO.	7
2.3: TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES.	8
2.4: ORIENTAÇÃO AZIMUTAL E INCLINAÇÃO.	9
2.5: SEGUIDOR PASSIVO (ESQUERDA) E SEGUIDOR ATIVO (DIREITA).	9
2.6: DECLINAÇÃO SOLAR.....	11
2.7: ASCENSÃO RETA.	12
2.8: TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS FOTOSSENSÍVEIS.	14
2.9: ESQUEMÁTICO DE UM DIVISOR DE TENSÃO.....	15
2.10: DISPOSIÇÃO DOS LDR, VISTA FRONTAL E DE PERFIL.....	16
2.11: DISPOSIÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NO SISTEMA DE PETERSON.	17
2.12: DEPENDÊNCIA DA TENSÃO COM O ÂNGULO DE INCIDÊNCIA.....	18
2.13: DISPOSIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGEM.....	19
2.14: PROJEÇÃO DA SOMBRA DA BARRA NO PLANO XY.....	20
2.15: PROJEÇÃO GRÁFICA NO PLANO DA LATITUDE E DA LONGITUDE.....	22
2.16: PARQUE SOLAR DA GLINTT ENERGY.....	23
3.1: MERIDIANO DE GREENWICH E LSTM.....	26
3.2: ÂNGULO DE ZÉNITE E ALTITUDE SOLAR.	28
3.3: SISTEMA DE CONTROLO EM ANEL FECHADO PARA SEGUIMENTO SOLAR.	29
3.4: HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM EM TONS BEM DEFINIDOS.....	30
4.1: MONTAGEM PARA CONTROLO DO ROBÔ E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	35
4.2: REPRESENTAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO NUM SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANO.....	36
4.3: CÂMARA ODROID.	38
4.4: IMAGEM BINARIZADA E HISTOGRAMAS.	40
4.5: REPRESENTAÇÃO DOS EIXOS DE ROTAÇÃO DO ROBÔ.	41
4.6: REFERENCIAL DA BÚSSOLA FACE À CÂMARA E BASE DO ROBÔ.	41
4.7: COMUNICAÇÃO ENTRE OS VÁRIOS MÓDULOS DO SISTEMA DE SEGUIMENTO.	42
4.8: DISTRIBUIÇÃO DOS PINOS NO CABO RJ-45 E NA TOMADA DA PLACA DE PROTOTIPAGEM.	43
4.9: REPRESENTAÇÃO DO ALGORITMO DE SEGUIMENTO BASEADO EM EQUAÇÕES MATEMÁTICAS.	44

4.10: REPRESENTAÇÃO DO ALGORITMO DE SEGUIMENTO BASEADO EM PROCESSAMENTO DE IMAGEM.	45
4.11: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE DESVIO.....	46
4.12: FLUXOGRAMA DO MODO AUTÓNOMO.	47
4.13: FLUXOGRAMA DO MODO AUTÓNOMO COM MEMÓRIA.	48
4.14: INTERFACE DO UTILIZADOR (PROCESSAMENTO DE IMAGEM).	49
4.15: INTERFACE DO UTILIZADOR (RESULTADOS MATEMÁTICOS E LOCALIZAÇÃO GPS).	50
4.16: INTERFACE DO UTILIZADOR (INFORMAÇÃO RESULTANTE DA COMUNICAÇÃO SÉRIE).	51
4.17: INTERFACE DO UTILIZADOR (CONTROLO DO ROBÔ E ESCOLHA DO MODO DE FUNCIONAMENTO).....	51
4.18: INTERFACE DO UTILIZADOR (INFORMAÇÃO ASSOCIADA AO ERRO DE SEGUIMENTO).	52
4.19: ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO IMPLEMENTADA NO SISTEMA.	52
5.1: MONTAGEM EXPERIMENTAL.	57
5.2: PROJEÇÃO ORTOGONAL, VISTA DE CIMA DA MONTAGEM A.....	57
5.3: RAZÃO ENTRE NÚMERO DE PÍXEIS E ÂNGULO DE DESVIO HORIZONTAL, RESULTANTE DA MONTAGEM A.	58
5.4: PROJEÇÃO ORTOGONAL, VISTA LATERAL DA MONTAGEM A.....	59
5.5: RAZÃO ENTRE NÚMERO DE PÍXEIS E ÂNGULO DE DESVIO VERTICAL, RESULTANTE DA MONTAGEM A.....	60
5.6: PROJEÇÃO ORTOGONAL, VISTA DE CIMA DA MONTAGEM B.....	61
5.7: RAZÃO ENTRE NÚMERO DE PÍXEIS E ÂNGULO DE DESVIO HORIZONTAL, RESULTANTE DA MONTAGEM B.	62
5.8: PROJEÇÃO ORTOGONAL, VISTA LATERAL DA MONTAGEM B.	63
5.9: RAZÃO ENTRE NÚMERO DE PÍXEIS E ÂNGULO DE DESVIO VERTICAL, RESULTANTE DA MONTAGEM B.	63
5.10: ANDAMENTO DO ROBÔ AO LONGO DO DIA 20 DE JULHO.....	66
5.11: DESVIO ENTRE VALORES REAIS E TEÓRICOS NO DIA 20 DE JULHO.....	67
5.12: ANDAMENTO DO ROBÔ AO LONGO DO DIA 30 DE JUNHO.	68
5.13: DESVIO DO SOL AO CENTRO DA IMAGEM E DESVIO ABSOLUTO ENTRE CURVA REAL E TEÓRICA, NO DIA 30 DE JUNHO. ..	69
5.14: ANDAMENTO DO ROBÔ AO LONGO DO DIA 28 DE JULHO.....	70
5.15: DESVIO DO SOL AO CENTRO DA IMAGEM NO TESTE REALIZADO A 28 DE JULHO.	70
5.16: RELAÇÃO ENTRE DESVIOS (TOPO) E REPRESENTAÇÃO DO DESVIO DE IMAGEM (BAIXO).	71
5.17: ACOMPANHAMENTO DA TRAJETÓRIA SOLAR EM FUNÇÃO DO MODO DE SEGUIMENTO.....	73

Índice de Tabelas

2.1: PARÂMETROS SOLARES CALCULADOS POR DIFERENTES AUTORES.....	13
2.2: POTÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA EM WATT [W], COM DOIS TIPOS DE SEGUIMENTO.	22
5.1: CORRELAÇÃO ENTRE DESVIO HORIZONTAL, ÂNGULO DE DESVIO E NÚMERO DE PÍXEIS.	58
5.2: CORRELAÇÃO ENTRE DESVIO VERTICAL, ÂNGULO DE DESVIO E NÚMERO DE PÍXEIS.	59
5.3: COMPARAÇÃO DAS RAZÕES RESULTANTES DOS MÉTODOS A E B, E RESPECTIVAS INCERTEZAS.....	64

Acrónimos

CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CPV	Fotovoltaico de concentração (<i>Concentrator Photovoltaics</i>)
EoT	Equação do tempo (<i>Equation of Time</i>)
LDR	Fotoresistência (<i>Light Dependent Resistor</i>)
LST	Hora solar local (<i>Local Solar Time</i>)
LSTM	<i>Local Standard Time Meridian</i>
LT	Hora local (<i>Local Time</i>)
PLC	Controlador lógico programável (<i>Programmable Logic Controller</i>)
TC	Fator de correção do tempo (<i>Time Correction Factor</i>)
UTC	Tempo Universal Coordenado

Simbologia

H	ângulo horário (°)
Z	ângulo de zénite (°)
α	ângulo de elevação (°)
β	ângulo de inclinação (°)
γ_c	ângulo azimutal de superfície (°)
γ_s	ângulo de azimuth (°)
δ	ângulo de declinação solar (°)
θ	ângulo de incidência solar (°)
φ	latitude (°)

Introdução

Neste capítulo é feita uma breve introdução ao trabalho realizado, começando-se pela motivação que levou à sua execução, seguida dos objetivos e da contribuição inovadora do sistema implementado. Por fim é apresentada a estrutura da dissertação, que permitirá elucidar o leitor sobre o trabalho realizado na mesma.

1.1 Motivação

A energia elétrica tem um papel preponderante no bem-estar da sociedade atual. No entanto, o célere crescimento do consumo energético tem conduzido a grandes repercussões no fornecimento contínuo de energia, cuja procura tem vindo a aumentar significativamente ao longo dos anos (Oliveira 2013). Este facto conduziu ao aumento do consumo de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica, por forma a suprir a procura atual, traduzindo-se em impactos económicos e ambientais de relevo. Para minimizar estes impactos, têm surgido novas fontes de produção com o intuito de se reduzir a dependência dos meios de produção convencionais, nomeadamente fontes de energia renováveis, provenientes de recursos naturais como Sol, vento, marés, entre outros.

Dada a imprevisibilidade dos recursos naturais e o baixo rendimento de algumas tecnologias que permitem a produção de energia elétrica a partir destes, é necessário o desenvolvimento de mecanismos que permitam maximizar a quantidade de energia produzida e, consequentemente, o rendimento das instalações onde se encontram inseridos. Serve este aspeto de motivação para o desenvolvimento de um robô que permita encontrar a orientação do vetor solar (direção dos raios solares) em tempo real, enviando-a posteriormente aos seguidores solares presentes num parque

fotovoltaico, consistindo num sistema barato e ao mesmo tempo fiável. Assim, a energia despendida pelo sistema será muito inferior à energia utilizada na deteção realizada individualmente pelos seguidores, tratando-se de um sistema, ao invés de dezenas ou centenas.

Ainda a título de motivação, constata-se o fato deste tema de dissertação ter sido proposto pela indústria, o que revela interesse no desenvolvimento deste tipo de tecnologias, por parte do mercado e da indústria fotovoltaica.

1.2 Objetivos

Tendo em consideração o título da dissertação, a execução desta tem como objetivos:

- Analisar o comportamento das estratégias de seguimento atualmente utilizadas no seguimento solar, procurando compreender a eficiência das mesmas, de forma a escolher a estratégia ou estratégias mais adequadas ao sistema pretendido.
- Implementar um sistema barato e fiável composto por um robô de seguimento solar de dois eixos visando encontrar a orientação que permite maximizar a produção fotovoltaica, com o intuito de aumentar a produção da central onde se encontra instalado. Encontrada a orientação que maximiza a produção solar, o sistema de seguimento tem como função, informar os restantes seguidores solares instalados no parque solar fotovoltaico de concentração.
- Implementar estratégias de seguimento que garantam a precisão necessária para este tipo de seguimento. Uma vez que, a produção dos sistemas fotovoltaicos de concentração está diretamente relacionada com a precisão do seguimento.

1.3 Contribuições originais

As contribuições decorrentes do trabalho efetuado resumem-se a:

- Desenvolvimento de um seguidor solar de dois eixos, conjugando métodos de controlo em anel aberto, tendo por base equações matemáticas, e em anel fechado, através da identificação do Sol e respetiva orientação, baseado em processamento de imagem e na leitura de sensores (bússola e GPS) em tempo real.

- Estudo do desempenho do sistema desenvolvido e sua comparação com resultados teóricos, permitindo validar o comportamento e desempenho do sistema implementado, tendo em consideração os sistemas referidos na literatura.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, incluindo o presente, de Introdução e seguintes, apresentados de seguida:

Capítulo 2 **Estado da Arte:** apresenta a revisão bibliografia do tema abordado na presente dissertação. Inicialmente são descritos vários tipos de seguidores solares, bem como a aplicabilidade dos mesmos, evidenciando-se ainda os métodos de seguimento atuais, referindo as suas vantagens e desvantagens. Assim, o capítulo está repartido em:

2.1 **Fotovoltaico de concentração (CPV):** refere-se a importância do fator de concentração nos sistemas fotovoltaicos, evidenciando-se o rendimento destes face aos sistemas fotovoltaicos comuns. Realça-se ainda a importância da precisão de seguimento, de acordo com o fator de concentração utilizado.

2.2 **Seguidores solares:** apresentam-se os diversos tipos de seguidores existentes, nomeadamente, seguidores de um eixo (horizontais ou de eixo inclinado) e seguidores de dois eixos, que permitem o seguimento da trajetória solar nas suas duas componentes (vertical e horizontal).

2.3 **Métodos de seguimento solar:** evidenciam-se as estratégias de seguimento atualmente utilizadas em sistemas de seguimento ativo, ou seja, que recorrem a mecanismos elétricos e sistemas de controlo eletrónicos. Assim, são abordados sistemas de seguimento: com controlo em anel aberto, baseados em equações matemáticas; com controlo em anel fechado, baseados em eletrónica fotossensível ou em processamento de imagem, visando o aumento da precisão de seguimento.

2.4 **Exemplo: Parque solar da Glintt Energy:** é apresentada uma instalação fotovoltaica de concentração em que é necessária elevada precisão de seguimento, na qual o sistema de seguimento implementado nesta dissertação poderia ser aplicado.

Capítulo 3 **Sistema de seguimento solar: Metodologia:** compreende a exposição dos formalismos matemáticos que permitem calcular as componentes da trajetória solar, descritas em ângulo de azimute e inclinação. Este capítulo inclui também a descrição dos algoritmos que permitem a tratamento da imagem e a identificação do Sol na mesma.

Capítulo 4 **Implementação do sistema de seguimento solar**: contém a descrição do sistema implementado na dissertação, exibindo em detalhe os vários módulos compreendidos neste, os quais são apresentados de seguida:

4.1 **Descrição do sistema**: compreende uma breve descrição do modelo implementado, referindo-se as estratégias de seguimento e modos de funcionamento nos quais o sistema opera.

4.2 **Modelo analítico da orientação solar**: como o modelo que permite o cálculo da posição aparente do sol necessita de dados referentes à localização geográfica da instalação, esta secção contém também uma breve descrição dos sensores usados para aquisição desses dados.

4.3 **Modelo baseado em processamento de imagem**: descrevem-se os sensores utilizados para a aquisição de imagem, dando-se enfoque ao sensor empregue no sistema, expondo-se de forma mais aprofundada o funcionamento do mesmo.

4.4 **Implementação física**: apresenta-se a estrutura do robô que constitui o sistema de seguimento e algumas otimizações físicas do mesmo.

4.5 **Controlador**: compreende os algoritmos de controlo do sistema de seguimento, nomeadamente modo autónomo e modo autónomo com memória. São ainda apresentadas as estratégias de seguimento (3.1 e 3.2) que integram os modos de seguimento anteriormente referidos.

4.6 **Aplicação informática**: exhibe-se a interface gráfica que permite ao utilizador controlar os vários módulos do sistema, possibilitando a escolha do modo de seguimento e ainda a visualização dos dados adquiridos em tempo real pelos sensores.

Capítulo 5 **Procedimento e análise de resultados**: no início do capítulo são apresentados os procedimentos experimentais para calibração dos sensores constituintes do sistema (bússola e câmara). De seguida é explicado o procedimento que permite a conversão de píxeis em graus, de forma a normalizar os dados, para posterior análise do erro de seguimento. Por fim são analisados os resultados que permitem a validação do sistema implementado.

Capítulo 6 **Conclusões**: neste capítulo são apresentadas conclusões resultantes da reflexão sobre o trabalho realizado, dando ainda lugar ao subcapítulo **Trabalho Futuro** (6.2), onde são referidas possíveis abordagens futuras com o intuito de melhorar a precisão do sistema de seguimento realizado.

Estado da Arte

Serve o presente capítulo para apresentar a revisão bibliográfica sobre o tema abordado neste trabalho. Inicialmente é referida a utilidade dos seguidores solares, evidenciando-se os tipos de seguidores existentes. São ainda apresentados os métodos de seguimento solar atuais, fazendo-se uma breve descrição do seu funcionamento e desenvolvimento, apresentando-se ainda alguns exemplos que possibilitaram o avanço das tecnologias aplicadas atualmente. Por fim é feita uma breve comparação dos métodos apresentados, referindo-se as vantagens e desvantagens destes, tendo em conta a sua precisão.

2.1 Fotovoltaico de concentração (CPV)

Os sistemas de elevada concentração fotovoltaica permitem obter um maior aproveitamento do espectro solar, baseando-se na utilização de células multijunção¹, pelo fato desta tecnologia em células comerciais apresentar um rendimento de 40% (Green 2003), podendo mesmo atingir os 50%, o que faz com que estes sistemas apresentem um rendimento superior sistemas de baixa concentração que utilizam células de junção única. Este rendimento resulta não só do melhor aproveitamento do espectro solar, mas também do espaço ocupado pela instalação.

As células multijunção são geralmente constituídas por elementos do grupo III e V da Tabela Periódica, como as células de Arsenieto de Gálio (GaAs), cujo processo de fabrico sendo

¹As células multijunção: são células solares com múltiplas junções P-N feitas de diferentes materiais semicondutores. A junção P-N de cada material produzirá corrente elétrica, em resposta aos diferentes comprimentos de onda de luz (Green 2003).

complexo, implica um elevado custo de produção quando comparado com as células de silício cristalino. Portanto, a implementação desta tecnologia obriga ao uso de células de pequena dimensão aliadas a meios de concentração, para igualar a área de incidência solar, uma vez que os dispositivos de concentração apresentam um custo muito inferior, quando comparados a células com a mesma área (Figura 2.1 - direita).

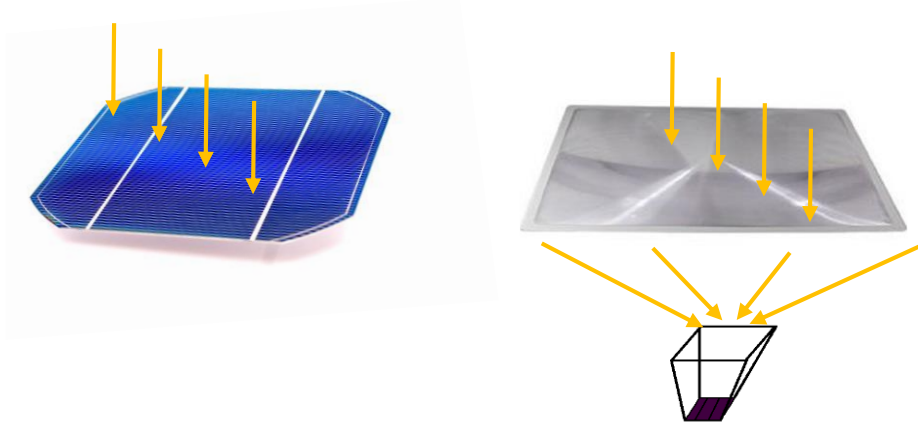


Figura 2.1: Comparação entre fotovoltaico sem concentração (esquerda) e CPV (direita).

O aumento da produção pode ser conseguido à custa da maximização da concentração dos raios solares nas células, em que a utilização de meios refrativos, como o vidro, possibilita um incremento da concentração. Esta é descrita pela equação 2.1.

$$C_{\max} = \frac{n^2}{\sin^2 \theta} \quad 2.1$$

C_{\max} representa a concentração máxima, n consiste no fator de refração e θ representa o ângulo de aceitação dos raios solares, representado na Figura 2.2.

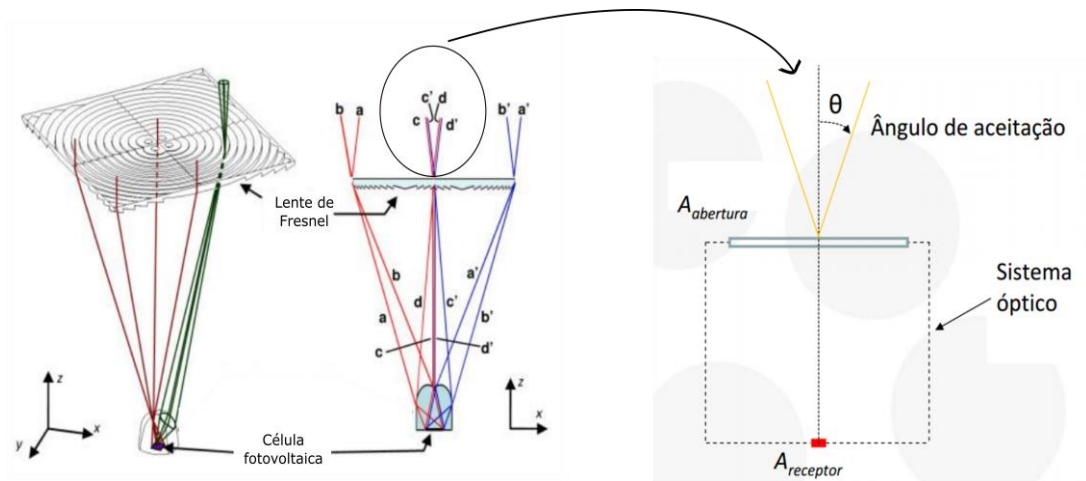


Figura 2.2: Ângulo de aceitação em sistemas de elevada concentração. Adaptado de (António Joyce 2010).

Pelo fato de utilizarem apenas a radiação direta, os concentradores fotovoltaicos necessitam de estar permanentemente orientados com o Sol, implicando o seu acoplamento a um sistema mecânico/seguidor solar.

Como é possível observar na Figura 2.2 – esquerda, o ângulo de aceitação depende da estrutura física do concentrador e do fator de concentração do mesmo. Caso este não seja respeitado, com incidência de raios num ângulo superior a θ , estes não incidiriam na célula fotovoltaica, deteriorando a produção do sistema.

2.2 Seguidores solares

Os seguidores solares permitem orientar os painéis fotovoltaicos de forma a que a superfície destes se encontre alinhada perpendicularmente aos raios provenientes do Sol, possibilitando assim a maximização do aproveitamento solar.

Atualmente existem vários tipos de aproveitamento solar fotovoltaico onde o nível de precisão varia de acordo com a tecnologia implementada. Como exemplo, os sistemas fotovoltaicos de concentração necessitam de um maior rigor em termos de alinhamento, ao contrário dos sistemas compostos por células policristalinas, onde o alinhamento pode ser menos rigoroso. Desta forma, foram surgindo vários tipos de sistemas de seguimento, compostos por um ou dois eixos de seguimento como apresentado na Figura 2.3.

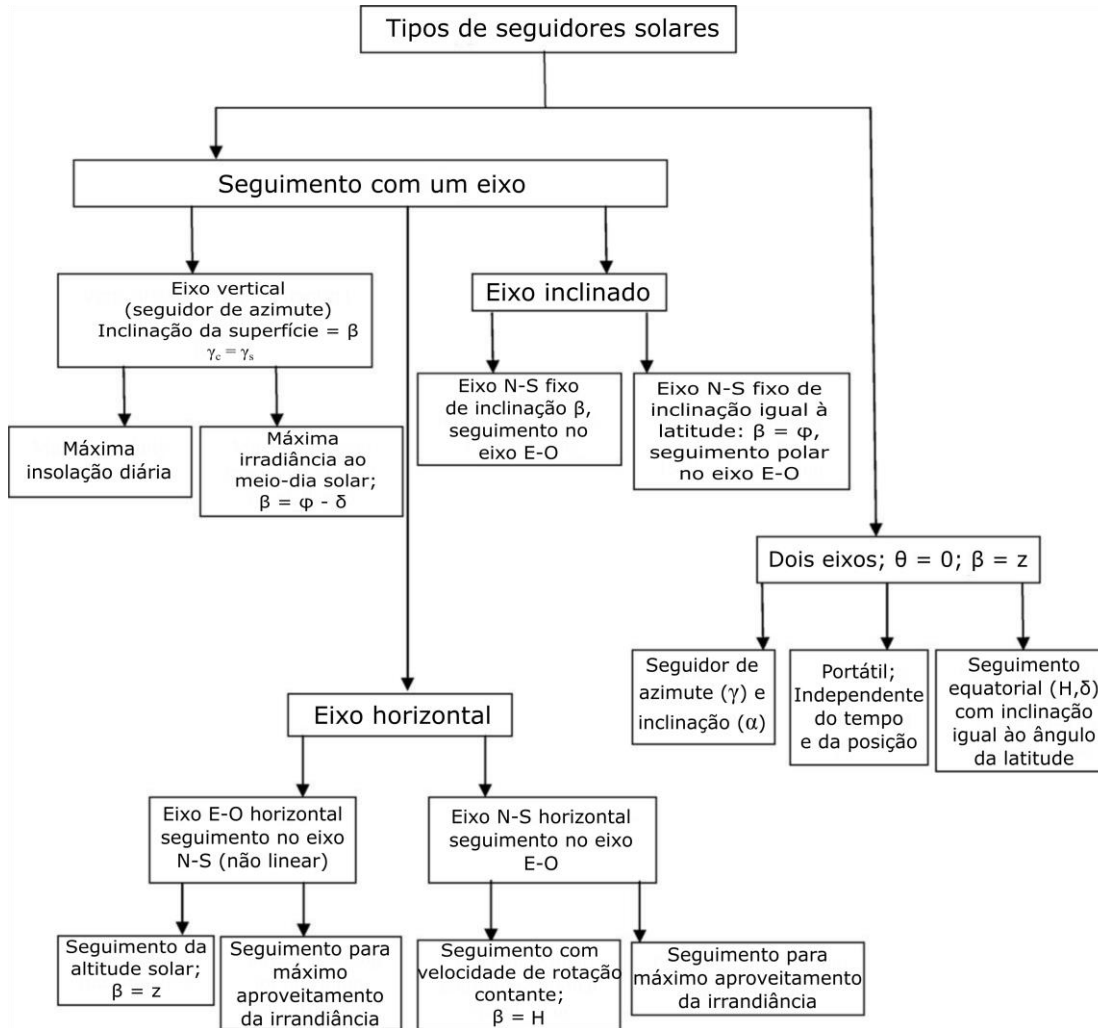


Figura 2.3: Tipos de seguidores solares. Adaptado de (Mousazadeh et al. 2009).

O seguimento efetuado num eixo, denominado de seguimento azimutal, consiste na rotação do seguidor em torno do eixo vertical, onde o sistema acompanha a componente horizontal da trajetória solar (movimento azimutal), como mostra a Figura 2.4. Neste tipo de seguimento a superfície dos painéis encontra-se inclinada numa posição fixa em torno do eixo horizontal, a qual depende do local onde o sistema se encontra instalado.

O seguimento efetuado em dois eixos, para além da rotação no eixo vertical, onde o sistema acompanha o Sol de acordo com o seu movimento azimutal, permite ainda acompanhar o movimento de elevação solar também denominado como ângulo de zénite, através da rotação em torno do eixo horizontal.

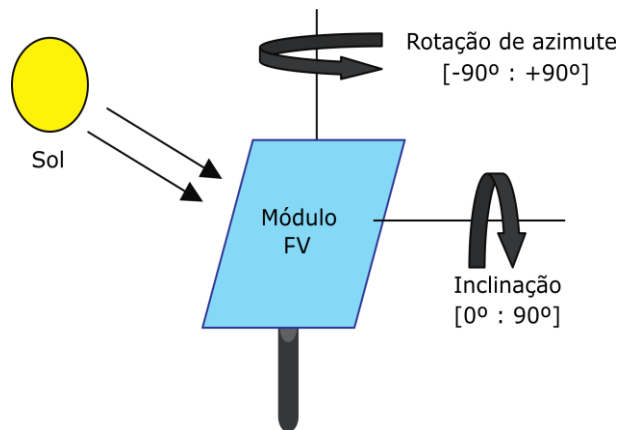


Figura 2.4: Orientação azimutal e inclinação. Adaptado de (Miloudi et al. 2013).

Em suma, pode concluir-se que o seguimento solar em dois eixos permite acompanhar o movimento do Sol de forma mais precisa, uma vez que não se desvaloriza o movimento de nenhuma componente da trajetória solar, conseguindo-se um aumento da conversão diária. Como exemplo, em (Abdallah & Nijmeh 2004) implementou-se um seguidor de dois eixos, obtendo-se experimentalmente um aumento médio da colheita diária em cerca de 40% face aos sistemas de seguimento de um eixo.

2.3 Métodos de seguimento solar

Os sistemas de seguimento estão divididos em duas classes, seguimento ativo e seguimento passivo, ilustrados na Figura 2.5.

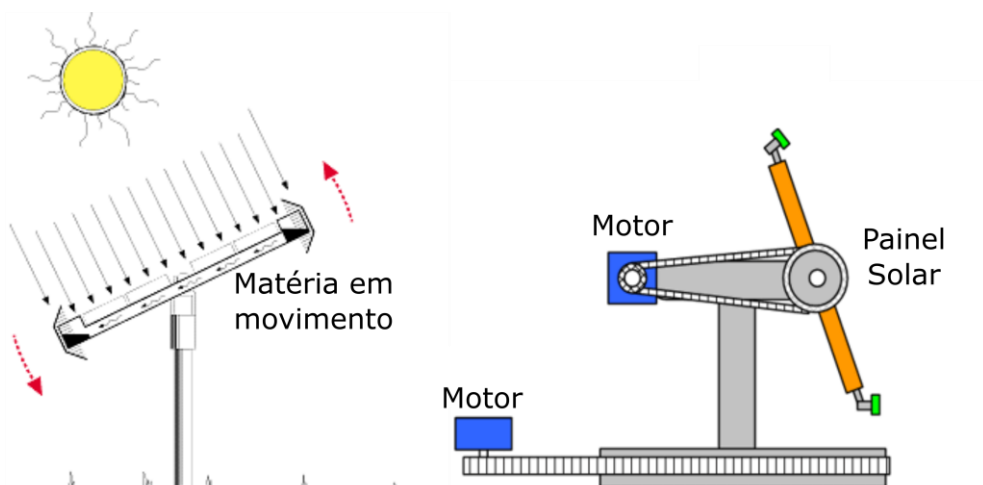


Figura 2.5: Seguidor passivo (esquerda) e seguidor ativo (direita). Adaptado de (http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_que_es.html).

Seguidores passivos conseguem seguir a trajetória do Sol de forma mecânica (Mousazadeh et al. 2009) através da expansão térmica de um material. Estes seguidores são compostos por atuadores mecânicos idênticos em que a diferença na luminosidade incidente entre partes do sistema provoca um desequilíbrio mecânico, orientando o sistema de forma perpendicular aos raios solares, de forma a reencontrar o ponto de equilíbrio. Sendo menos complexos e mais baratos que os seguidores ativos, os seguidores passivos são menos eficientes, não funcionando a baixas temperaturas, devido às limitações físicas (expansão térmica) do material utilizado.

Os seguidores ativos por sua vez são caracterizados pela sua composição elétrica, sendo por norma constituídos por sensores fotossensíveis responsáveis pela aquisição de dados relacionados com a incidência solar e microcontroladores que analisam os dados recolhidos, enviando a informação aos atuadores de forma a orientar corretamente o sistema. Os seguidores ativos, porém, podem ser baseados em sistemas em anel aberto² onde se recorre a formalismos matemáticos para prever a posição do Sol, tendo por base a data atual e informação geográfica (Chong & Wong 2010). Nos sistemas em anel fechado³ são usados sensores fotossensíveis para detetar a direção dos raios solares, considerando o sinal de *feedback* que indica o erro resultante do movimento anterior, com o intuito de o compensar na iteração seguinte. De forma a melhorar a precisão do seguimento solar têm sido desenvolvidos sistemas híbridos que conjugam os cenários em anel aberto e em anel fechado.

Existem, portanto, várias estratégias de seguimento solar que se enquadram na classe dos sistemas de seguimento ativos, as quais serão explicadas adiante.

2.3.1 Seguimento baseado em equações matemáticas

Estes sistemas baseiam-se em equações matemáticas que modelizam a trajetória solar, permitindo calcular a direção dos raios provenientes do Sol, geralmente denominada por vetor solar, com base na localização geográfica e na hora atual (Blanco-Muriel et al. 2001). Assim, o sistema de seguimento necessita de conhecer as coordenadas correspondentes à sua posição física,

² Um sistema em anel aberto produz um sinal de saída com base no seu estado atual e no modelo do sistema. Porém, como não utiliza retroação para determinar se a sua saída atingiu o objetivo pretendido, este não consegue observar o resultado dos processos que está a controlar, impossibilitando-o de corrigir eventuais perturbações que possam advir.

³ Um sistema em anel fechado permite atingir a condição de saída desejada, comparando-a com a condição atual. Para isso é gerado um sinal de erro que representa a diferença entre saída e a entrada de referência, sendo usado na iteração seguinte de forma a minimizar essa diferença.

descritas pela latitude e pela longitude, num dado instante particularizado pela data e pelo tempo universal coordenado (UTC).

No entanto, a orientação do Sol, descrita pelos ângulos Azimute e Zénite, é obtida à custa de vários parâmetros como a Declinação Solar, Ascensão reta (AR) e Equação do Tempo (EoT), explicados de seguida.

Declinação solar δ – Corresponde ao ângulo formado entre a linha que liga o centro do Sol ao centro da Terra e o plano do Equador (Masters 2013), como mostra a Figura 2.6.

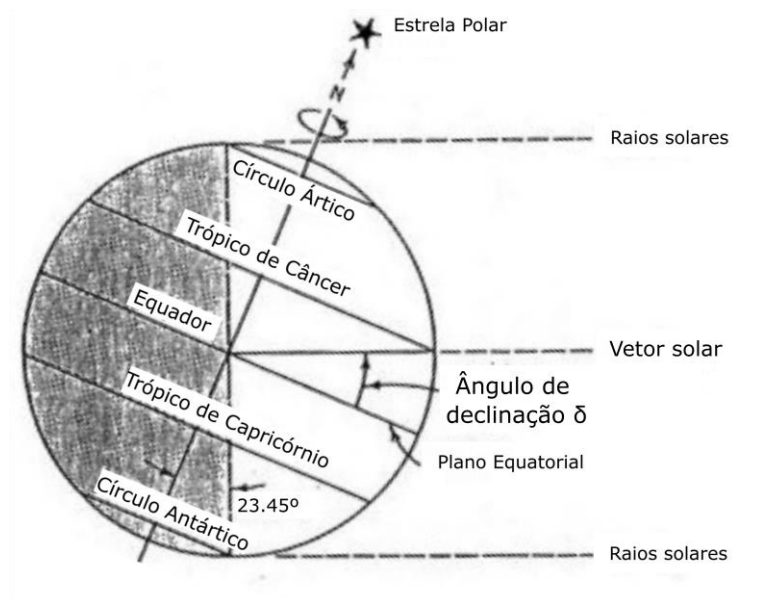


Figura 2.6: Declinação solar. Adaptado de (<http://pixgood.com/solar-declination.html>).

Ascensão reta (AR) – é a distância angular medida para leste ao longo do equador desde o Equinócio Vernal até à hora pretendida, mostrado na Figura 2.7.

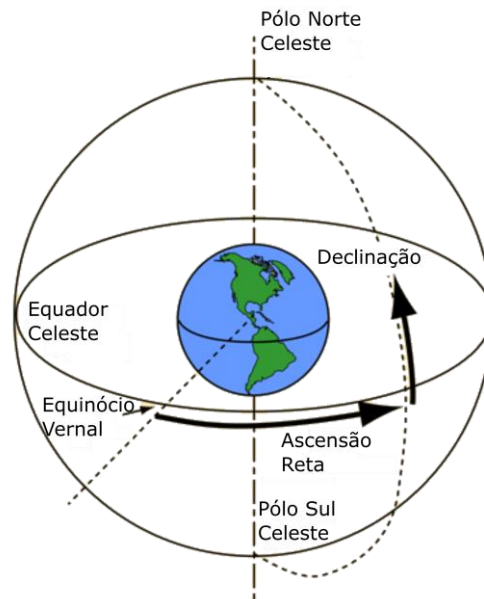


Figura 2.7: Ascensão reta. Adaptado de (Georgia Satate University 2015).

Equação do Tempo (EoT) – representa a diferença entre os tempos solares médio e verdadeiro (o primeiro menos o segundo) em função do dia do ano. A Equação do Tempo tem um máximo de +16 minutos no início de novembro e um mínimo de -14 minutos no início de fevereiro (Instituto Camões 2006).

Ângulo de azimute (γ) – é a distância em torno de um objeto, paralelo ao horizonte a partir de um ponto pré-definido (Sea and Sky 1998). Medido normalmente a partir do ponto cardeal Norte, variando de 0 a 360°.

Ângulo de zénite (Z) – é o ângulo formado entre a direção dos raios solares e a vertical, ou ponto diretamente acima do observador (Schombert 2011), varia entre 0 e 90°.

Em 1969 foi publicado, por P.I. Cooper (Cooper 1969; Blanco-Muriel et al. 2001), o primeiro algoritmo capaz de calcular a declinação solar, tendo por base o dia do ano. Pouco depois em 1971, surgiu um novo algoritmo publicado por Spencer, sendo este capaz de calcular a declinação solar e a Equação de Tempo (Spencer 1989). Contudo o autor concluiu que a introdução do dia atual sob a forma de um número inteiro induzia um erro de aproximadamente 0,5 graus na declinação solar nos equinócios, uma vez que, o dia do ano varia de forma contínua ao longo do tempo. Em 1976 surgiram outras equações apresentadas por Swift (Swift 1976), que permitiam o cálculo da declinação solar de forma mais simples, todavia estas eram menos precisas que as equações de Spencer.

Os algoritmos com maior precisão surgiram em 1978, onde Pitman e Vant-Hull com base nas equações publicadas no *The Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac* de 1961 e comparando os modelos de previsão de irradiância direta com leituras obtidas experimentalmente, alcançaram equações capazes de calcular as coordenadas elípticas do Sol, a declinação solar e a equação de tempo (Pitman & Vant-Hull 1978; Blanco-Muriel et al. 2001).

Ainda em 1978, Walraven apresentou um algoritmo apto a calcular localmente as coordenadas do Sol, nomeadamente a ascensão reta, e os ângulos de azimuth e zénite. Porém, o algoritmo por Walraven apresentado, não funcionava corretamente na previsão dos dias antecedentes a 1 de Março em anos bissextos, além de exibir valores incorretos no hemisfério sul (Blanco-Muriel et al. 2001; Walraven 1978).

Em 1988, Michalsky publicou um algoritmo baseado nas equações simplificadas do *Nautical Almanac*, capaz de calcular as verdadeiras coordenadas horizontais do Sol, com maior precisão que Walraven (Michalsky 1988). A Tabela 2.1 apresenta o resumo dos parâmetros calculados pelos diferentes autores.

Tabela 2.1: Parâmetros solares calculados por diferentes autores. (Blanco-Muriel et al. 2001)

Autor	Declinação	Ascensão reta	Equação de Tempo	Ângulo de Azimute	Ângulo de Zénite
Cooper, 1969	X				
Spencer, 1971	X		X		
Swift, 1976	X				
Pitman e Vant-Hull, 1978	X		X		
Walraven, 1978	X	X		X	X
Lamm, 1981			X		
Michalsky, 1988	X	X	X	X	X

Por fim, no ano 2000 foi apresentado um novo algoritmo denominado de *PSA Algorithm* (Blanco-Muriel et al. 2001), que para além de ser mais preciso que o algoritmo de Michalsky é computacionalmente mais eficaz. O aumento velocidade de processamento foi conseguido devido à simplificação das expressões e eliminação das operações desnecessárias para calcular as coordenadas horizontais do Sol, sendo estas válidas nos dois hemisférios. Já a precisão foi

melhorada através da modificação das equações do *Nautical Almanac* também utilizadas por Michalsky.

Em suma pode concluir-se que o algoritmo de Michalsky é o método mais utilizado atualmente sendo o mais completo e robusto dos algoritmos apresentados antes do século XXI, possibilitando estimar as verdadeiras coordenadas horizontais do Sol. Pois, embora o *PSA Algorithm* seja mais preciso e eficaz que o algoritmo de Michalsky, este necessita de uma validação a longo prazo, encontrando-se de momento validado no período de 1999 a 2015.

2.3.2 Seguimento com recurso a eletrónica fotossensível

Estes sistemas são geralmente constituídos por um microcontrolador e componentes eletrónicos sensíveis à luminosidade. Por serem sistemas em anel fechado, estes baseiam-se em princípios de controlo de *feedback*, usando o valor da iteração anterior para corrigir o valor atual.

Os primeiros sistemas de seguimento solar baseados em sensores fotossensíveis continham um par de fotoresistências vulgarmente denominadas *Light Dependent Resistor* (LDR) ou por um par de células fotovoltaicas eletricamente semelhantes (Mousazadeh et al. 2009), dispostas segundo várias técnicas apresentadas na Figura 2.8.

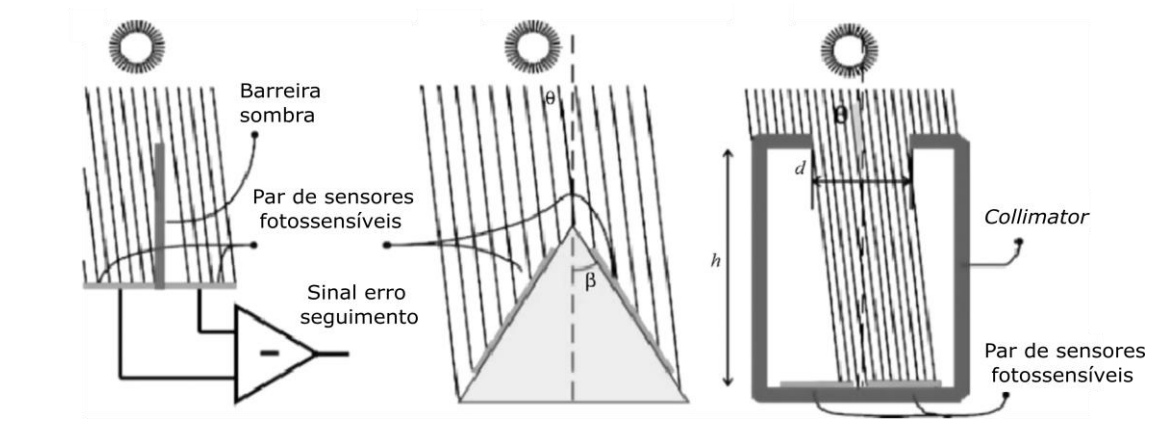


Figura 2.8: Técnicas de disposição dos elementos fotossensíveis. Adaptado de (Mousazadeh et al. 2009).

A variante de luminosidade entre sensores origina um sinal elétrico utilizado pelo microcontrolador de forma a calcular a posição relativa do Sol, determinando os sinais a enviar ao sistema de controlo para orientação do plano frontal do sistema, alinhando-o perpendicularmente à direção dos raios solares.

Al-Mohamad desenvolveu um sistema de seguimento solar com um eixo de rotação, baseado num controlador lógico programável (PLC). Sendo este composto por dois sensores de luminosidade, formados a partir de resistências e LDR (Al-Mohamad 2004). Os sensores, porém, encontram-se dispostos no plano do painel fotovoltaico separados por uma barreira, a qual provoca sombra num dos LDR, caso o sistema se encontre desalinhado com o vetor solar.

As propriedades físicas dos LDR variam de acordo com a intensidade da radiação incidente, diminuindo a resistência com um aumento da luminosidade. A montagem dos sensores consiste num divisor de tensão, exemplificado na Figura 2.9.

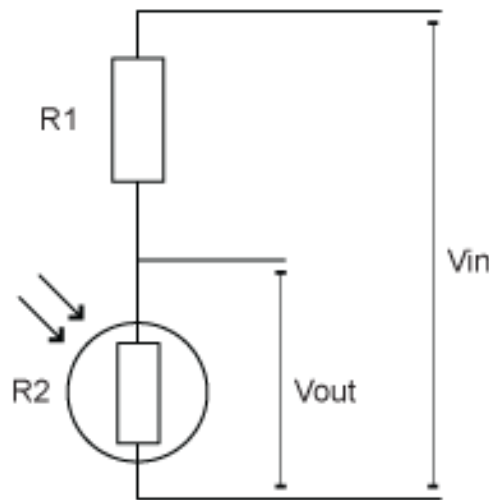


Figura 2.9: Esquemático de um divisor de tensão. Fazendo a analogia com a figura acima, os sensores são alimentados com uma tensão V_{in} , onde a variante de luminosidade afeta diretamente o valor resistivo dos LDR (representado por R_2), alterando tensão aos terminais deste de acordo com a expressão 2.2.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad 2.2$$

O sinal V_{out} , por sua vez, corresponde ao sinal de saída dos sensores, sendo posteriormente analisado pelo PLC de forma a posicionar corretamente o painel fotovoltaico.

Com o teste experimental do sistema, Al-Mohamad concluiu que o ganho de energia recolhido ao longo do dia é superior em 20%, comparando com instalações sem seguimento solar.

Bingöl apresentou um sistema de seguimento solar de dois eixos, considerando a declinação solar invariante ao longo do mês, tendo também em conta que esta pouco varia ao longo do ano (Bingöl et al. 2006) para valores de latitude em torno dos 10° , Bingöl testou ainda a suficiência do seguimento solar em torno de um eixo.

Para encontrar a direção do vetor solar, o sistema contém quatro LDR baseados no princípio anteriormente referido, presente na Figura 2.9. Estes encontram-se dispostos a 45° do plano frontal do sistema, distantes 90° entre si como mostra a Figura 2.10.

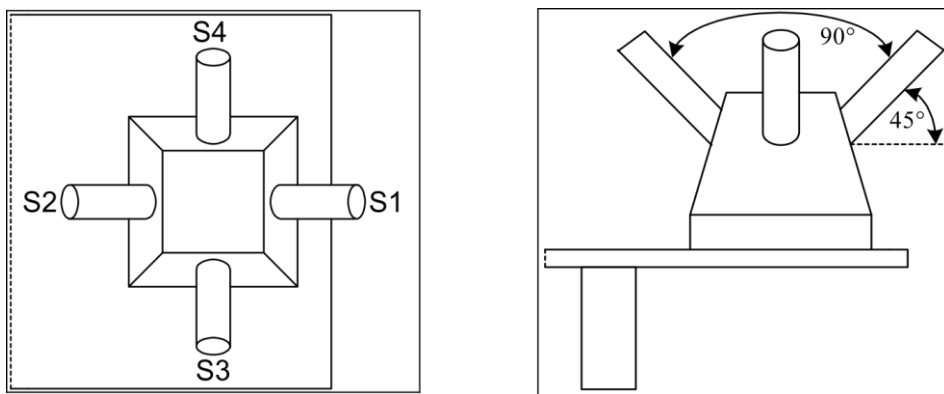


Figura 2.10: Disposição dos LDR, vista frontal e de perfil. Adaptado de (Bingöl et al. 2006).

Os LDR encontram-se no interior de tubos cilíndricos, dois deles permitem recolher dados de forma a controlar o ângulo de azimuth, estando orientados na direção Este-Oeste, enquanto os outros dois permitem controlar o ângulo de inclinação, sendo posicionados na direção Sul-Norte (Bingöl et al. 2006).

Sempre que a diferença entre os sensores S1 e S2 ou entre S3 e S4 for maior que um valor pré-definido, o microcontrolador envia um sinal ao atuador correspondente de forma a alinhar o sistema corretamente, diminuindo de novo a diferença entre sensores. Uma vez que, quando o sistema estiver corretamente alinhado, o valor de luminosidade deverá ser idêntico em todos os LDR. O sistema tem ainda a capacidade de suspender a atividade, de acordo com o nível de radiação incidente, suspendendo geralmente a atividade a Oeste, quando a luminosidade se encontra abaixo do valor pré-definido denominado *Threshold* ou limiar. Com um aumento da luminosidade superando o limiar, o sistema retoma a atividade orientando-se para Este.

Os testes realizados medindo a temperatura do plano frontal do sistema, permitiram concluir que a densidade luminosa incidente é maior em sistemas com seguimento solar, quando equiparados a sistemas estacionários. Todavia, os autores concluíram que o desempenho do

seguidor era diretamente afetado pela refração atmosférica, causada pela chuva, pelas nuvens e pelo nevoeiro. O que originava erro na detecção do vetor solar.

Jinayim desenvolveu um sistema de seguimento bastante eficiente em termos de consumo energético, permitindo seguir a componente horizontal da trajetória do Sol, dispondo apenas de um eixo de rotação (Jinayim et al. 2007). O sensor em si é composto um foto-transístor, presente no interior de uma caixa preta com um pequeno orifício paralelo ao plano do painel fotovoltaico. O processo de seguimento consiste em fazer mover o plano do painel onde está acoplado o sensor, de forma a encontrar o valor máximo de luminosidade. Uma vez atingido, o microcontrolador envia um sinal ao atuador de forma a posicionar o painel no ponto ótimo, parando-o de seguida. Quando o valor de luminosidade incidente no foto-transístor se encontra num nível inferior ao pré-definido (limiar), o microcontrolador envia um sinal ao atuador com vista a encontrar de novo um ponto ótimo de funcionamento. No entanto, o autor não recomenda o uso de seguimento solar em pequenos sistemas de produção fotovoltaica, uma vez que o acréscimo do rendimento com seguimento solar não é suficiente para compensar as perdas e a energia consumida pelos atuadores.

Em 2005, Peterson apresentou um seguidor solar de dois eixos contendo dois painéis fotovoltaicos. O sistema de seguimento não dispõe de LDR, foto-transístores ou foto-díodos, baseando-se unicamente na tensão aos terminais dos dois painéis instalados, montados segundo o princípio apresentado na Figura 2.11.

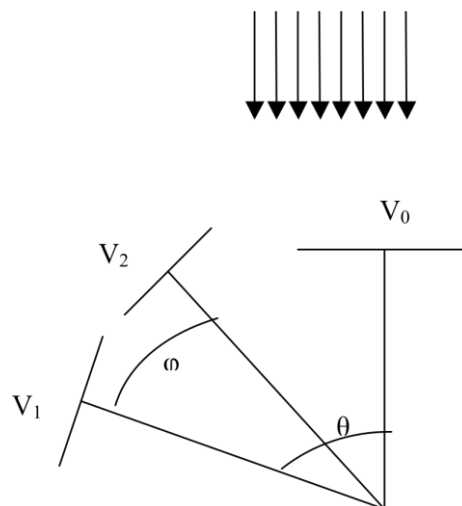


Figura 2.11: Disposição dos painéis fotovoltaicos no sistema de Peterson. (Peterson et al. 2005)

Sabendo que a tensão máxima aos terminais do painel fotovoltaico ocorre quando este se encontra orientado perpendicularmente aos raios provenientes do Sol, é possível deduzir que caso

o painel não se encontre ortogonal à fonte de luz, a tensão aos seus terminais diminui com o decremento da área projetada, representada pelo *co-seno* do ângulo θ , presente na Figura 2.12.

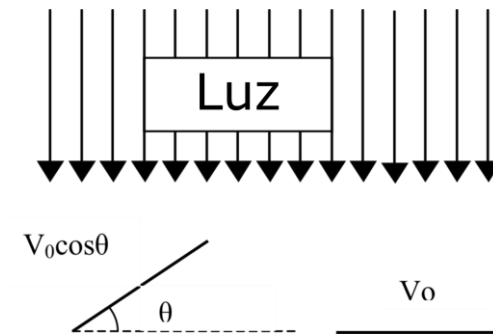


Figura 2.12: Dependência da tensão com o ângulo de incidência. Adaptado de (Peterson et al. 2005).

O sistema apresentado opera em três modos (Peterson et al. 2005). O primeiro consiste em mover o plano dos painéis, descrevendo um círculo segundo coordenadas esféricas com um raio escolhido pelo utilizador, de forma a encontrar o ponto ótimo de tensão. Em que, o valor de tensão é guardado ao longo do movimento, sendo depois analisado com o intuito de reposicionar o sistema na localização onde foi registado o valor máximo

O segundo método consiste em analisar o gradiente de tensão aos terminais dos painéis fotovoltaicos apresentados na Figura 2.11, durante a descrição de um círculo, encontrando a direção da fonte de luz. Posto isto o sistema é reposicionado, podendo ficar aquém das coordenadas que descreveram o movimento anterior.

O terceiro método consiste em encontrar cinco pontos de hora-a-hora, com base na inclinação e no ângulo de azimute através do segundo método, construindo uma curva que descreva a trajetória solar. Em que, usando hora atual, o dia do ano e a sua latitude, é possível prever a direção do movimento.

No entanto os autores concluíram que a resolução máxima do sistema se situa em torno dos 6° . Deduziram também que com desvio de um grau em relação à perpendicular é possível alcançar 99,98% da tensão máxima, enquanto com um desvio de 10° a tensão obtida corresponde a 98,5% do seu valor máximo.

2.3.3 Seguimento baseado em processamento de imagem

Os sistemas de seguimentos solar baseados em processamento de imagem visam encontrar a posição do Sol direta ou indiretamente através da captura de imagens e seu processamento em tempo real de forma a retirar informação relevante nelas contida.

Processamento da imagem criada pela sombra de uma barra

Consiste num sistema de seguimento solar com dois graus de liberdade, baseado no processamento da imagem criada pela sombra de uma barra. Sendo independente da localização geográfica, da configuração e do tempo iniciais. O sistema apresentado não recorre a formalismos matemáticos para prever a direção dos raios provenientes do Sol. Consiste, portanto, na aplicação de uma barra telescópica sobre um suporte de vidro e uma câmara que permite captar a sombra da barra presente na tela branca sob o vidro, como mostra a Figura 2.13.

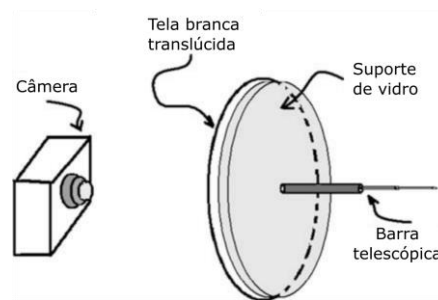


Figura 2.13: Disposição física do sistema de aquisição de imagem. Adaptado de (Arbab et al. 2009).

Ao investigar a variante da dimensão geométrica da sombra da barra ao longo do tempo, bem como a sua posição na tela em relação ao ponto de referência, é possível saber a direção dos raios incidentes. Para isso é necessário ainda considerar um sistema de coordenadas cartesiano XYZ, onde o plano XY assenta na superfície do vidro, tomando a barra telescópica, o eixo Z.

Com o plano XY dividido em quatro quadrantes, a incidência de raios solares na tela sob o vidro, permite a criação de uma região sombreada de acordo com ângulo de alinhamento, exemplificado na Figura 2.14 pela reta inclinada.

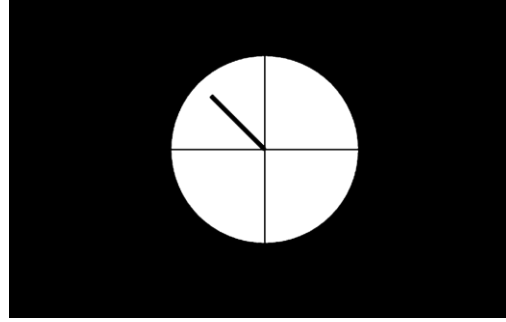


Figura 2.14: Projeção da sombra da barra no plano XY. (Arbab et al. 2009)

Do plano XY é importante referir que o eixo X se encontra paralelo ao plano do solo e o eixo Y perpendicular ao anterior. Os quadrantes são dispostos da seguinte forma:

- 1º quadrante: $X > 0 \quad Y > 0$
- 2º quadrante: $X < 0 \quad Y > 0$
- 3º quadrante: $X < 0 \quad Y < 0$
- 4º quadrante: $X > 0 \quad Y < 0$

O sistema atua sempre que seja notória uma variação significativa na imagem atual, em relação à anterior. Por norma a figura apresenta uma linha preta numa superfície branca, em que a linha representa a sombra da barra telescópica. A sombra por sua vez é formada na direção oposta aos raios solares.

A rotação dos motores visa a diminuição do comprimento da sombra criada pela barra, uma vez que atingido o alinhamento apenas será apresentado um ponto na tela branca, correspondendo este à seção em corte da barra telescópica. Para isso o motor de azimuth atua de forma a criar uma linha vertical, alinhando o sistema horizontalmente, enquanto o motor de elevação atua de forma a encurtar o comprimento da projeção da linha, alinhando o sistema verticalmente.

No entanto, a mecanismo de controlo é elementar uma vez que o tempo de revolução dos motores depende proporcionalmente do comprimento da área sombreada, apresentado na equação 2.3.

$$\begin{aligned} |X| &= A \times t_{az} \\ |Y| &= A \times t_{el} \end{aligned} \tag{2.3}$$

t_{az} representa o tempo de revolução do motor de azimute, enquanto t_{al} corresponde ao tempo de revolução do motor de elevação. A e B são duas constantes que permitem o ajuste do tempo de revolução dos motores de azimute e elevação, respetivamente.

O sistema possui ainda uma resistência fotossensível, que permite avaliar o nível de luminosidade instantâneo. Inicialmente é definido um valor mínimo de luminosidade, designado *Threshold* ou limiar, que determina o funcionamento do sistema, pelo que este opera quando a luminosidade for maior que o nível estabelecido anteriormente.

Processamento de imagem captada com objetiva *Fisheye*

Este tipo de seguimento consiste no processamento de imagens panorâmicas, obtidas através de objetivas *Fisheye* ou olho de peixe, visando encontrar a posição instantânea do Sol. Para isso são captadas imagens a partir do solo com uma abertura aproximada de 180°, normalmente de Este para Oeste.

A imagem capturada é trabalhada de forma a realçar a posição do Sol, para isto são aplicadas algumas transformações (Wang et al. 2006), de forma a encontrar o ponto mais brilhante da imagem, que decerto corresponderá ao Sol. Assim, é necessário aplicar uma transformação de *RGB* para *HSI*, ou seja, cada pixel da imagem original, constituído por três canais: vermelho (R), verde (G) e azul (B), é caracterizado pelo matiz (H), pela saturação (S) e pela intensidade (I). Esta transformação consiste na aplicação de um filtro matemático que permite realçar as áreas de grande intensidade luminosa, através do ajuste dos coeficientes de cada um destes parâmetros. Feita a transformação são destacadas as regiões que obedecem à equação 2.4 presente em (Haiyan 2009).

$$P = \{p_i \mid H_{pi} \leq \psi_H \cup I_{pi} \geq \psi_I\}, \text{ com } i = 1, 2, \dots \quad 2.4$$

Onde ψ_H e ψ_I correspondem aos valores limiar do matiz e da intensidade. Estes coeficientes encontram-se tabelados com valores de 50 e 150 respetivamente, como resultado da análise estatística efetuada sobre testes experimentais (Wang et al. 2006).

Para que seja possível localizar com precisão a origem dos raios solares é necessário aplicar uma segunda transformação aritmética, pois a captura pela objetiva olho de peixe origina imagens anamórficas. Desta transformação resulta uma projeção no plano da longitude e da latitude, visível na Figura 2.15.

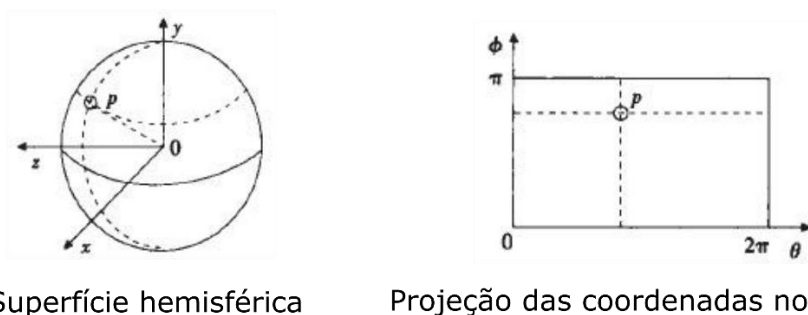


Figura 2.15: Projeção gráfica no plano da latitude e da longitude. Adaptado de (Haiyan 2009).

Efetuada a transformação para o plano das coordenadas é indispensável realizar o mapeamento de forma que cada ponto da imagem resultante corresponda a um ponto no plano original, obtido através de outras transformações matemáticas (Haiyan 2009).

De acordo com o estudo efetuado pelo autor, é possível verificar que o seguimento solar através de processamento de imagem com o método utilizado é mais eficaz que o seguimento solar com base em equações matemáticas, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Potência de uma célula fotovoltaica em watt [W], com dois tipos de seguimento. (Haiyan 2009)

Seguimento / tempo	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Imagem	65.4	80.2	90.2	105.5	107.8	113.4	115.3	112.5	108.3	90.7	81.4
Equações	65.1	79.3	88.6	103.2	105.1	108.0	109.3	106.7	102.2	82.5	71.2

No entanto apesar de ser mais preciso que o seguimento com base em equações matemáticas, este tipo de seguimento apresenta alguns inconvenientes pois a sua precisão é diretamente afetada pela reflexão dos raios solares em aviões, entre outros e pela radiação difusa criada pelas nuvens.

2.4 Exemplo: Parque solar da Glintt Energy

Situado na periferia da cidade de Évora, o parque solar da Glintt Energy dispõe de 2900 painéis fotovoltaicos de concentração.

Tratando-se de aproveitamento fotovoltaico de concentração, o vetor normal à superfície dos painéis deverá coincidir com a direção dos raios solares, uma vez que a produção destes é

diretamente influenciada pela precisão do alinhamento. Assim, o tipo de seguimento implementado no parque é misto. Numa primeira fase é utilizado um algoritmo para calcular a posição do Sol no horizonte num determinado momento do dia, considerando a hora, data, posição no globo terrestre e altitude. Numa segunda instância é realizada uma correção ao posicionamento do seguidor considerando o tratamento dos dados recolhidos de sensores solares colocados em cada seguidor que corrigem eventuais variações na inclinação e rotação do seguidor em relação ao Sol. Sendo as estruturas metálicas e havendo diversos elementos mecânicos estas estão sujeitas a dilatações e folgas que podem originar pequenos desvios, que desta forma, são compensados.

Cada seguidor solar contém um par de sensores, um para medir o desvio Norte/Sul e outro para medir o desvio Este/Oeste, visível na Figura 2.16, estando dispostos de forma distribuída ao longo do parque. Porém, apesar da gestão ser feita por seguidor considerando as especificidades de cada elemento, existe apenas um sistema de controlo no parque. Assim, os sensores estão ligados por cabo a uma interface desenvolvida especificamente para ligação com um PLC, responsável pela comunicação do *software* de controlo do parque através de rede informática.

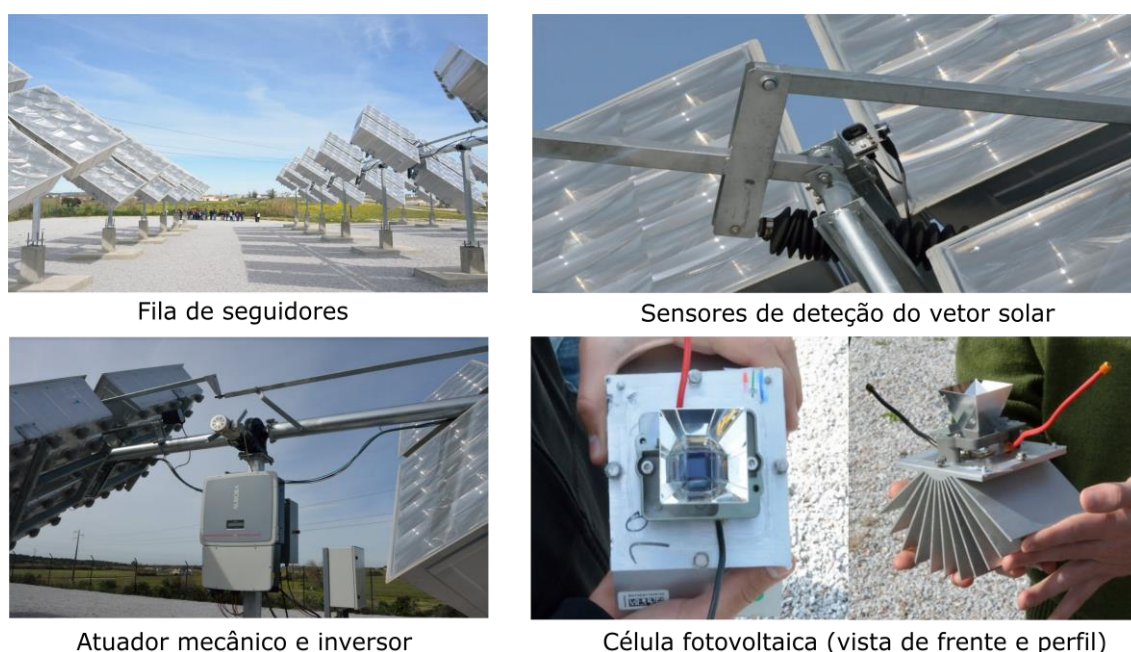


Figura 2.16: Parque solar da Glinnt Energy.

2.5 Considerações finais

Em síntese, tendo em conta a viabilidade energética da instalação de seguimento solar em sistemas de produção fotovoltaica, existem atualmente vários tipos de seguidores assim como métodos de seguimento solar, adaptados às necessidades do sistema implementado.

A elevada precisão de seguimento requerida por sistemas, nomeadamente sistemas solares de concentração, denominados de concentradores fotovoltaicos (CPV), permitiu a aplicação de diversas técnicas ao longo dos anos. Desde sistemas em anel aberto que permitem o seguimento recorrendo a formalismos matemáticos, tendo por base informação geográfica, aos sistemas em anel fechado que recorrem a eletrónica sensível à luminosidade, visando encontrar a direção dos raios solares, onde o seguimento é ajustado ao longo do tempo de acordo a variação do ângulo de incidência.

De forma a minimizar o erro de seguimento, neste trabalho pretende-se contruir um sistema híbrido, conjugando os métodos usados nos sistemas acima referidos. Consistindo a implementação num sistema de seguimento baseado em equações matemáticas com o auxílio de processamento de imagem, onde os métodos se complementam de forma a aumentar o rendimento do aproveitamento solar.

Sistema de seguimento solar: Metodologia

As metodologias apresentadas neste capítulo permitem exemplificar de forma genérica, vários métodos utilizados no seguimento solar. Numa primeira fase é apresentado um sistema de seguimento tendo por base o modelo analítico da posição aparente do Sol. Sendo posteriormente citado um sistema de seguimento suportado pela identificação do Sol em imagens, recorrendo ainda a sensores para mensurar a orientação encontrada.

3.1 Modelo analítico da posição aparente do Sol

O modelo analítico da posição aparente do Sol, permite a implementação de um sistema de seguimento solar com controlo em anel aberto. Sendo, no entanto, necessários alguns dados, como as coordenadas geográficas do sistema e ainda a data e hora atuais.

O modelo analítico presente nas definições de seguida elencadas e nas equações 3.1 a 3.9, a elas associadas. Tem como base a pesquisa de Rizvi (Rizvi et al. 2014), onde os autores reúnem informação sobre vários algoritmos de seguimento e comprovam que é possível utilizar um algoritmo de baixa complexidade, obtendo ainda assim resultados precisos.

Tempo Local Standard do Meridiano (LSTM)

LSTM corresponde ao meridiano de referência para um determinado fuso horário, como mostra a Figura 3.1. A diferença (em graus) entre este e o Meridiano de Greenwich, também denominado de meridiano principal, pode ser calculada de acordo com a equação 3.1.

$$LSTM = 15 \cdot (TempoLocal - GMT) \quad 3.1$$

O tempo local representa o tempo civil marcado pelo relógio. De notar que em Portugal no horário de verão a equação 3.1 deverá ser acertada⁴ para GMT +1, de forma a coincidir com o UTC. Onde GMT e UTC correspondem a *Greenwich Mean Time* e *Universal Time Coordinated* ou Hora Média de *Greenwich* e Tempo Universal Coordenado em português, respetivamente.

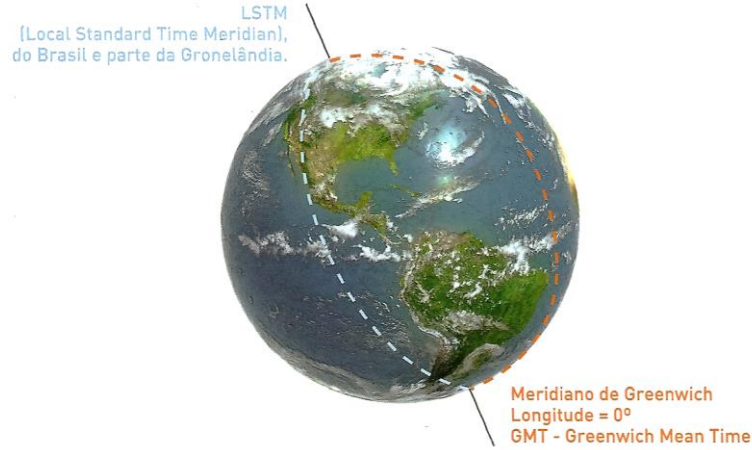


Figura 3.1: Meridiano de Greenwich e LSTM. (Morais 2009)

Equação do Tempo (EoT)

A EoT permite quantificar diferença entre o tempo civil marcado pelo relógio e a hora solar local. Como esta diferença não é constante, foram desenvolvidos vários formalismos que a modelizam. A equação 3.2 surgiu da aplicação de técnicas de ajuste de curva aos modelos propostos (Rizvi et al. 2014).

$$EoT = 9.87 \sin(2B) - 7.52 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad 3.2$$

Em que B é dado por:

$$B = \frac{(d - 81) \cdot 360}{365} \quad 3.3$$

⁴ Pelo fato de Portugal usar horário de verão (*Daylight Saving Time*).

Com d o número do dia em questão, com $d = 1$ no dia 1 de janeiro e $d = 365$ no dia 31 de dezembro.

Fator de Correção do Tempo (TC)

O fator de correção do tempo (TC) permite o ajuste da hora solar local (LST) tendo em conta a variação de longitude, pois o ponto de observação pode não corresponder exatamente ao tempo local *standard* do Meridiano (LSTM). Este é apresentado em minutos, de acordo com a equação 3.4.

$$TC = 4 \cdot (Longitude - LSTM) + EoT \quad 3.4$$

A multiplicação por 4 resulta do movimento de rotação da Terra, ao ritmo de 1° a cada 4 minutos.

Hora Solar Local (LST)

A hora solar local pode ser calculada com base nos indicadores explicados anteriormente de acordo com a equação 3.5, apresentado em horas.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad 3.5$$

LT representa a hora civil marcada pelo relógio.

Ângulo horário local (h)

O ângulo horário local permite a representação das horas em graus. Considerando que ao meio dia solar o ângulo horário é nulo, sendo negativo de manhã e positivo à tarde, este pode ser calculado segundo a equação 3.6.

$$h = 15 \cdot (LST - 12) \quad 3.6$$

A constante 15 na equação resultado fato do dia estar dividido em 24 horas e uma rotação corresponder a 360° concluindo-se que a Terra roda 15° por hora.

Ângulo de Declinação Solar (δ)

Como mencionado em 2.3.1, a declinação solar corresponde ao ângulo formado entre a linha que liga o centro do Sol ao centro da Terra e o plano do Equador, podendo ser calculada pela equação 3.7.

$$\delta = 23.45 \cdot \left[\frac{(N - 81) \cdot 360}{365} \right] \quad 3.7$$

Ângulo de altitude solar (α)

O ângulo de altitude solar ou de elevação corresponde ao ângulo formado entre o plano horizontal à superfície terrestre e a direção dos raios provenientes do Sol, como mostra a Figura 3.2. A elevação do Sol pode determinar-se através da equação 3.8.

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos h] \quad 3.8$$



Figura 3.2: Ângulo de Zénite e altitude solar. (Morais 2009)

Ângulo de azimuth (γ)

Como descrito no subcapítulo 2.3.1, o ângulo de azimuth define a direção horizontal da trajetória solar. Ao meio dia o Sol encontra-se alinhado a Sul, o que se traduz num ângulo de azimuth de 180° (tomando o Norte como ponto de referência 0°), variando ao longo do dia segundo a equação 3.9.

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos h}{\cos \alpha} \right] \quad 3.9$$

A título de curiosidade, em dia de equinócio o Sol nasce a 90° e põe-se a 270° . Sendo variável com a latitude e época do ano.

3.2 Identificação do Sol numa imagem

Sabendo que os sistemas em anel aberto são falíveis, devido a erros resultantes de perturbações no sistema, uma outra forma de seguimento solar são os sistemas com controlo em anel fechado, tirando partido das suas propriedades de retroação. Depois de considerar vários métodos de deteção do vetor solar, decidiu-se implementar um sistema de deteção baseado em processamento de imagem, dada a sua precisão face aos outros métodos referidos na literatura.

A Figura 3.3 permite esquematizar o funcionamento deste tipo de sistemas. Inicialmente é capturada uma imagem para identificação do Sol, caso este seja identificado é contabilizado o desvio entre o centro do Sol na imagem e o centro da imagem em si, representado a desfasagem entre o vetor solar e a normal ao plano frontal do robô. Se esta desfasagem for superior ao limite admissível definido pelo utilizador, o robô deverá mover-se para reduzir a desfasagem em termos de alinhamento. Este processo é cíclico, por forma a garantir um correto alinhamento ao longo do dia. No entanto, a identificação do Sol na imagem é um processo complexo, composto por vários métodos explicados de seguida.

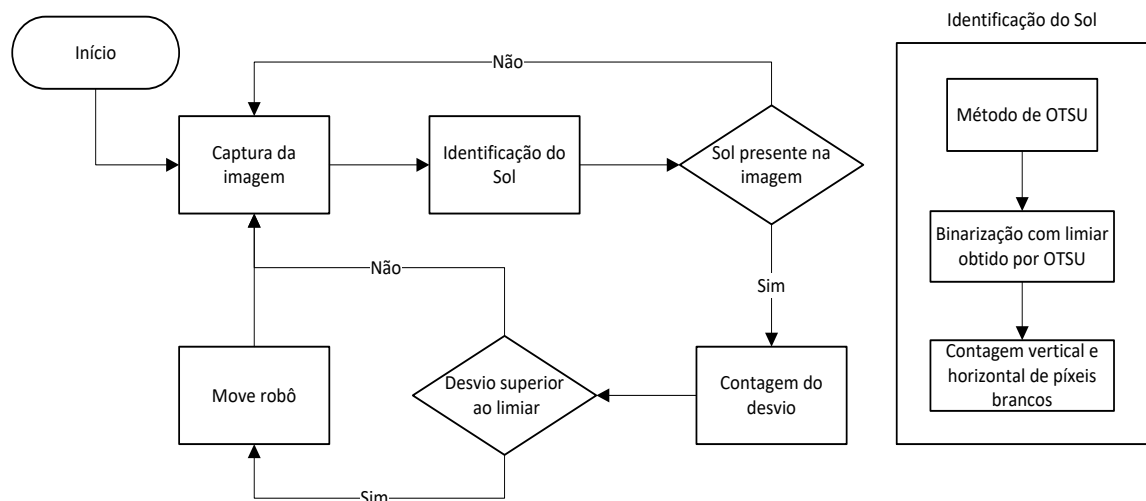


Figura 3.3: Sistema de controlo em anel fechado para seguimento solar.

Método OTSU

O método de OTSU visa encontrar o tom de cinza que melhor destaca a área de interesse, neste caso o foco mais brilhante na imagem. Numa primeira fase é construído um histograma com a contagem do número de píxeis por tom de cinza ou intensidade, variando de 0 (píxel preto) a 255 (píxel branco). Da construção do histograma derivam vários grupos, tomando como exemplo uma imagem em que os pontos claros se encontram bem separados dos pontos pretos, surgem dois grupos predominantes no histograma, Figura 3.4.

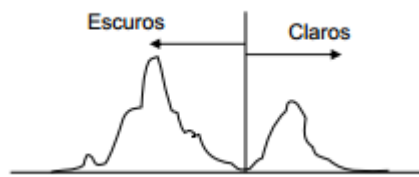


Figura 3.4: Histograma de uma imagem em tons bem definidos.

O método em si consiste na separação dos tons de cinzento em dois grupos, o mais homogêneos possível, com o intuito de minimizar a variância de cada um destes. Minimizando, por conseguinte, a variância conjunta. O algoritmo implementado foi desenvolvido por Nobuyuki Otsu, encontrando-se descrito em (Otsu 1979).

Binarização

A binarização é um método de segmentação de imagens, permitindo separar as áreas de interesse e de não interesse, sendo estas caracterizadas pelos seus píxeis a branco e preto. A segmentação consiste numa sequência de procedimentos aplicados a cada píxel da imagem original. Numa primeira fase é calculado o valor médio do píxel através da média dos canais que o constituem (RGB), de seguida esse valor é comparado com o limiar de binarização, caso seja inferior ao limiar, o píxel ficará com o valor 0 em todos os canais (píxel preto), caso seja superior ou igual ao limiar os canais adquirem o valor 255 tornando o píxel branco.

Identificação do Sol a partir da contagem de píxeis e respetivo histograma

Realizada a binarização, utilizando o valor resultante do método de OTSU como limiar de binarização, o Sol surge a branco na imagem, apresentando geralmente uma forma circular (em dias de céu limpo), sendo de fácil identificação na imagem a partir da contagem do número de píxeis e respetivo histograma. Tomando a imagem como uma matriz de duas dimensões, com

origem no píxel superior esquerdo desta: é realizada uma contagem vertical do número de píxeis brancos por linha e uma contagem horizontal do número de píxeis brancos por coluna. Dada a referida forma circular, os histogramas apresentam uma subida/descida com o pico (conjunto de valores máximos) a meio, o qual corresponde ao centro do Sol.

Identificado o centro do Sol, são enviadas coordenadas ao robô, de forma que este se alinhe com o vetor solar, sendo posteriormente recolhidos os ângulos de inclinação e de azimute através de uma bússola presente no mesmo. Os valores recolhidos caracterizam a posição aparente do Sol, não esquecendo a incerteza associada à medição destes.

3.3 Síntese

Neste capítulo foram apresentados dois métodos de seguimento solar: o primeiro método teve como base o modelo analítico da posição aparente do Sol, possibilitando o seguimento solar com alguma precisão. Embora não tenha em consideração eventuais perturbações ao sistema, por se tratar de uma estratégia de controlo em anel aberto. Por outro lado, o segundo método tem a capacidade de compensar estas perturbações, por consistir numa estratégia em anel fechado. Apesar de ter como menos valia uma maior necessidade computacional, pelo fato de se basear em processamento de imagem (exigente pela aplicação de operações ao elevado número de píxeis que constituem a imagem captada).

Implementação do sistema de seguimento solar

O presente capítulo visa dar a conhecer a implementação do sistema de seguimento, começando por evidenciar a aquisição de dados necessários ao cálculo da trajetória solar com base em modelos matemáticos, a aquisição de imagem e o seu processamento, de forma a extrair informação útil ao seguimento. É ainda apresentada a estrutura física do robô, bem como a disposição dos diversos sensores no mesmo, estando por fim estão descritos os modos de funcionamento no qual o sistema opera.

4.1 Descrição do sistema

Conhecendo as necessidades dos sistemas fotovoltaicos de concentração em termos de precisão de alinhamento com o vetor solar, implementou-se um sistema com o objetivo de adquirir a posição aparente do Sol em tempo real e de forma precisa.

O sistema tem por base um regime de controlo híbrido, conjugando duas estratégias de seguimento distintas:

- Seguimento em anel aberto através do modelo matemático da posição aparente do Sol. Necessitando de um GPS para aquisição das coordenadas geográficas do sistema, data e hora, necessárias para implementação do modelo matemático.
- Seguimento em anel fechado através da deteção do Sol em imagens captadas, encontrando a sua posição de modo empírico, através de uma câmara para captura da imagem e de uma bússola para conhecer orientação do robô e do Sol consequentemente (caso o robô se encontre alinhado com este).

A conjugação destas estratégias de seguimento é efetuada pelos modos de funcionamento, nos quais o sistema opera:

- Modo autónomo sem memória: conjuga as duas estratégias de seguimento acima referidas, permitindo encontrar a posição aparente do Sol através do modelo matemático, alinhando o robô com o mesmo. Quando o Sol estiver presente na imagem, adota-se a estratégia de seguimento em anel fechado, identificando o Sol, orientando o robô com este, adquirindo posteriormente os valores empíricos da orientação do vetor solar. Se houver uma obstrução que impeça a identificação do Sol na imagem captada, o sistema adota de novo o seguimento em anel aberto, baseado no modelo matemático.
- Modo autónomo com memória: semelhante ao anterior, usando as mesmas estratégias de seguimento. Porém, recorrendo ao histórico de andamento do Sol, este impede o seguimento de um segundo foco luminoso presente na imagem, resultante de fenómenos de reflexão em transportes aéreos ou refração dos raios solares nas nuvens.
- Modo interativo: modo através do qual o utilizador pode escolher a estratégia a implementar no seguimento, podendo ainda atuar manualmente nos servomotores, orientando o robô e escolhendo a velocidade do movimento.

Pelo fato de dispor de ligação à internet, o sistema poderá ser controlado remotamente, fornecendo a posição aparente do Sol aos restantes seguidores presentes no parque solar, possibilitando ainda a visualização e análise de vários dados como a imagem captada pelo robô, a orientação teórica e real do Sol, úteis no estudo de desempenho do sistema.

4.2 Modelo analítico da orientação solar

Como referido anteriormente no Capítulo 3, é possível conhecer em tempo real a posição aparente do Sol em relação ao ponto de observação. O cálculo destes valores advém de equações matemáticas que necessitam de informação relacionada com a localização geográfica do local onde o seguidor se encontra inserido. Para isso é necessário conhecer a latitude, longitude e hora atual do local, cuja aquisição se encontra explicada na seção subsequente.

4.2.1 Aquisição de dados

A aquisição de dados teve por base a plataforma Arduino, presente na Figura 4.1 pois sendo uma plataforma *Open Source* ou código aberto, permite a contribuição dos utilizadores de forma a desenvolver e melhorar a interface com periféricos como os sensores utilizados no sistema. O que possibilita uma maior abstração em termos de comunicação de baixo nível por parte do utilizador.

Como se trata de um microcontrolador livre de sistema operativo, onde o código é compilado para linguagem máquina e executado, o Arduino torna-se ágil e eficaz no desempenho das suas funções como a troca de dados com os periféricos, nomeadamente bússola e GPS. O Arduino escolhido tem como modelo MEGA 2560, devido à sua elevada capacidade de memória e número de portas de comunicação série, face a outras versões comuns como o Arduino UNO.

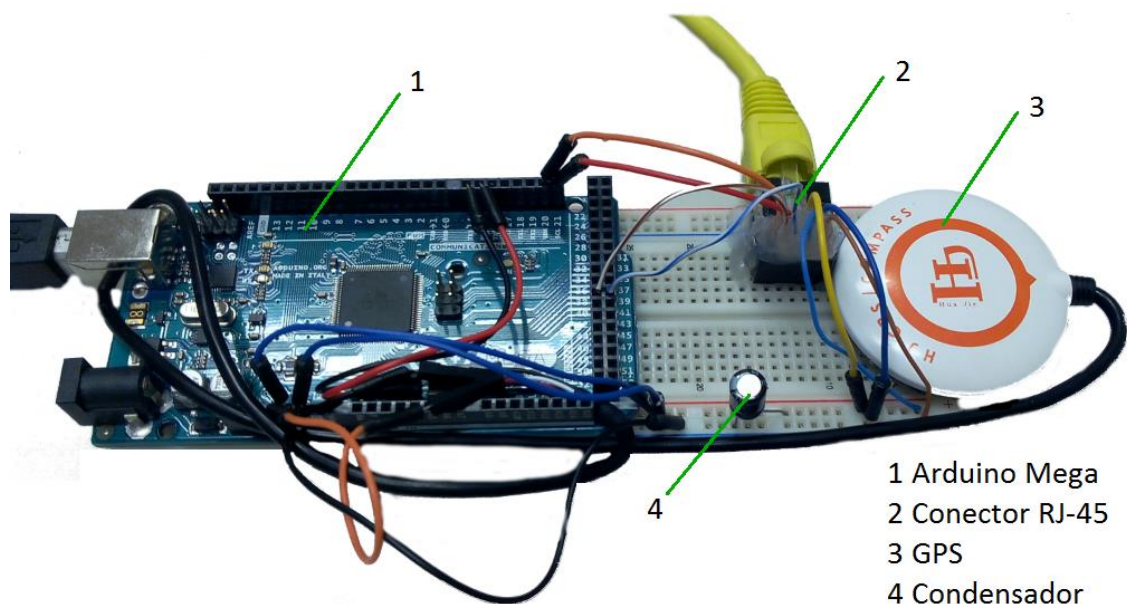


Figura 4.1: Montagem para controlo do robô e aquisição de dados.

GPS

Foi utilizado um módulo GPS baseado no modelo U-BLOX G7020, pois apresenta elevada precisão (inferior a 2 metros), curto período de arranque e rápido tempo de resposta, podendo fornecer leituras com uma frequência de 5 Hz, ou seja, 5 vezes por segundo.

A utilização do software fornecido pela marca possibilita a aquisição um vasto leque de informação, no entanto, o sistema apenas necessita de alguns dados como a data e hora locais, as

coordenadas geográficas descritas pela Latitude e Longitude, ainda o número de satélites, de forma a avaliar a credibilidade da informação.

A ligação do módulo GPS ao Arduino necessitou de algum cuidado uma vez que as definições de fábrica eram incompatíveis com o sistema a implementar. A taxa de transmissão de dados por exemplo, denominada de *Baudrate* situava-se nos 115200 bps, valor elevado e propício a erros tanto na transmissão de dados como na leitura pelo Arduino devido às ligações entre módulos. Verificou-se experimentalmente uma perda substancial de dados nos pacotes enviados pelo módulo GPS, tornando-os pouco fidedignos, levando à alteração da taxa de transmissão de dados para um valor mais baixo situado nos 19200 bps. A taxa de transmissão escolhida permite o envio de dados com a frequência de 3 vezes por segundo.

Bússola

O modelo utilizado tem pelo nome CMPS11, consiste numa bússola com compensação magnética composta por magnetómetro, giroscópio e acelerómetro, ambos de 3 eixos. Usando ainda um filtro de Kalman que conjuga os dados provenientes do acelerómetro e giroscópio de forma a minimizar o ruído e erro provocados pela inclinação da mesma, detalhe de extrema importância pelo fato da bússola se encontrar disposta no braço robótico.

Dos dados disponibilizados pela bússola, destacam-se a orientação a Norte ou ângulo de azimute (γ) e a rotação em torno do eixo dos yy (inclinação) conforme a Figura 4.2, denominadas vulgarmente de *Bearing/Yaw* e *Pitch*, nomeadamente.

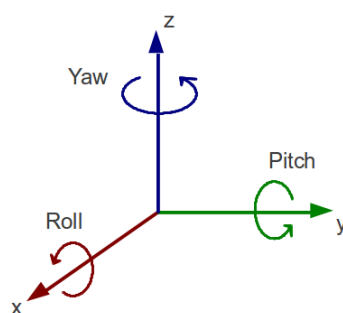


Figura 4.2: Representação dos ângulos de rotação num sistema de coordenadas cartesiano.

Envio dos dados para a aplicação informática

Os dados obtidos pela bússola e GPS são concentrados em pacotes e enviados pelo Arduino à frequência de 3 Hz para a aplicação que permite o controlo do robô. A comunicação entre

Arduino e o computador onde é executada a aplicação de controlo, baseia-se numa ligação série Rx/Tx. Esta comunicação permite ainda o controlo do robô através do envio da posição destino dos servomotores.

4.2.2 Implementação do modelo analítico da orientação solar

As equações do modelo para cálculo da posição aparente do Sol referidas em 3.1, foram implementadas através de uma interface gráfica desenvolvida em C#, explicada em detalhe no subcapítulo 4.6 - **Aplicação informática**. Ao receber os dados pela comunicação série, a aplicação calcula a orientação atual do Sol, enviando-a de seguida para os servomotores do robô, utilizando o mesmo meio de comunicação. O que permite o alinhamento do robô com a direção do vetor solar.

Apesar de se tratar de um sistema controlo em anel aberto, a leitura da orientação atual do robô através da bússola e sua comparação com os resultados teóricos, possibilita a análise de desempenho deste.

4.3 Modelo baseado em processamento de imagem

O processamento de imagem permite a manipulação de imagens com o intuito de retirar informação pertinente destas. Nesta seção demonstra-se como é feita a aquisição de imagem, o sensor escolhido para tal e o funcionamento do mesmo. São apresentados ainda os algoritmos de processamento e técnicas utilizadas visando a identificação do Sol nas imagens captadas em tempo real, por forma a encontrar a orientação do vetor solar.

4.3.1 Aquisição de imagem

Os sensores de imagem amplamente utilizados em câmaras digitais e de vídeo assentam em dois tipos: *Charge Coupled Device* (CCD) e *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS), em português, dispositivo acoplado por carga e semicondutor de óxido metálico complementar, respetivamente. Estes são constituídos por milhares de elementos fotossensíveis, capazes de converter energia sob a forma de radiação em energia elétrica, posteriormente transformados em sinais digitais.

Câmara Odroid

A aquisição de imagem é feita através de uma câmara Odroid presente na Figura 4.3, pelo fato desta possuir tecnologia CMOS. Os sensores baseados nesta tecnologia detêm algumas vantagens face aos sensores CCD, apresentado baixo consumo energético, até 100 vezes menor que um CCD equivalente, baixa tensão de alimentação e ainda um custo reduzido quando equiparados a sensores baseados em tecnologia CCD (Bigas et al. 2006).

O baixo consumo energético é um fator importante na escolha dos sensores de aquisição de imagem uma vez que se pretende minimizar o consumo do sistema de seguimento, aumentando desta forma a produção da instalação fotovoltaica.

Por se tratar de processamento de imagem em tempo real, privilegia-se a rapidez na aquisição de dados, onde os sensores CMOS se destacam pela flexibilidade em adquirir imagens num curto período de tempo (Hillebrand et al. 2000). Porém, esta tecnologia apresenta algumas desvantagens, como propensão ao ruído, especialmente em cenários de baixa luminosidade, o que se traduz na perda de qualidade face aos sensores CCD.



Figura 4.3: Câmara Odroid.

A câmara escolhida apresenta um consumo energético de 2,5 W, definido por uma tensão de alimentação contínua de 5 V e uma corrente de 500 mA. Como referido anteriormente é composta por um sensor CMOS de 1 megapixel, ou seja 1280 por 720 píxeis de resolução. Valor bastante aceitável para o processamento de imagem implementado, mais características no Anexo.

Filtro

Com o intuito de proteger o sensor de imagem presente na câmara foi aplicado um filtro físico a partir de um filme de poliéster com uma camada de óxido de ferro, usualmente encontrado em

disquetes. A presença deste permite uma redução substancial da radiação incidente no sensor, possibilitando, porém, a passagem no ponto mais intenso que corresponde à radiação direta do Sol.

4.3.2 Identificação do Sol numa imagem

O processamento informático das imagens captadas pela câmara foi realizado com base na biblioteca *OpenCV* (*Open Source Computer Vision*), que fornece ferramentas como a conversão da imagem em matrizes que contêm o valor *RGB* de cada píxel, permitindo também a análise e manipulação da imagem captada.

Com o intuito de otimizar a segmentação da imagem, destacando a área de interesse (correspondente ao Sol), o limiar de binarização será dinâmico. Adotando, portanto, o valor previamente calculado através do método de OTSU, para a imagem a segmentar.

Após a binarização, surgem a branco, os pontos mais brilhantes da imagem original. Sendo o Sol o ponto mais luminoso desta, este aparece a branco, apresentando uma geralmente uma forma circular como na Figura 4.4. Posto isto, a contagem dos píxeis brancos na horizontal faz-se da esquerda para a direita ao longo de 1280 colunas, enquanto a contagem vertical se faz de cima para baixo ao longo de 720 linhas. O resultado das contagens é apresentado sob a forma de histograma também presentes na Figura 4.4. Devido à forma circular do Sol (embora não pareça na figura devido à compactação da mesma), os histogramas caracterizam-se por subida/descida com o pico (conjunto de valores máximos) a meio. O qual corresponde ao centro do Sol pelo fato do centro apresentar um maior número de píxeis a branco ou uma maior distância entre extremos (coincidente com diâmetro do círculo).

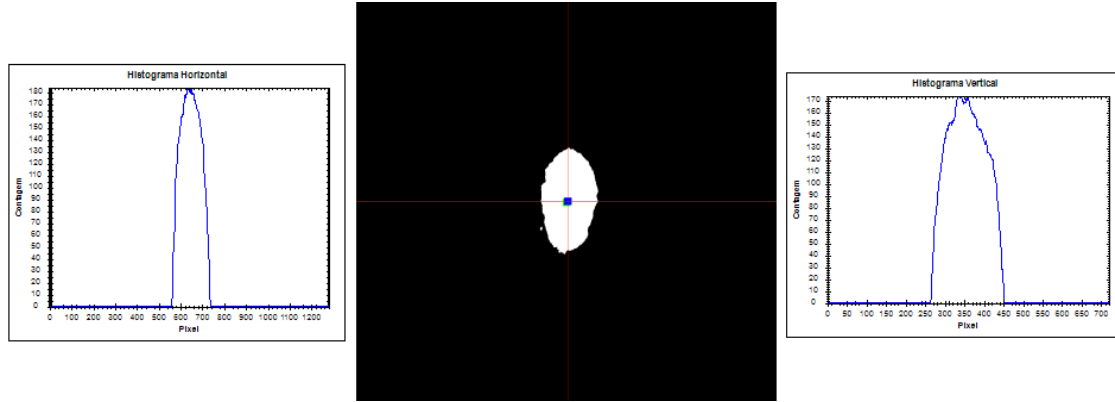


Figura 4.4: Imagem binarizada e histogramas.

Ao saber a linha e coluna que apresentam maior número de píxeis (representadas pelas linhas vermelhas) é possível conhecer as coordenadas do centróide associado à projeção do Sol na imagem, representadas pelo quadrado azul.

Identificado o centro do Sol na imagem, calculando a distância euclidiana (desvio) entre este e o centro da imagem é possível conhecer a posição relativa do Sol face ao referencial do robô. Somando esta à orientação do referencial do robô é possível conhecer a orientação real do Sol (equação 4.1).

$$O_{resultante}(h, v) = O_{referencial}(h, v) + Desvio(h, v) \quad 4.1$$

4.4 Implementação física

O sistema de seguimento solar necessita de vários sensores como notado em 4.2.1 e 4.3.1, serve a presente seção para demonstrar a sua disposição. Ao longo do capítulo é referida ainda a otimização do sistema ao nível do *hardware* e a implementação que permite o controlo do sistema, elucidada através de fluxogramas.

Estrutura

A estrutura do seguidor solar teve como base um robô de *Pick & Place* de 4 eixos. De forma a simplificar a estrutura deste foram retirados 2 eixos, uma vez que os restantes 2 permitem acompanhar a trajetória solar, conforme a Figura 4.5. Como limitação os servomotores apresentam um alcance de 180° e um passo de 1°, o que se verificou insuficiente no

acompanhamento horizontal da trajetória solar e no ajuste fino da posição com processamento de imagem, respetivamente.

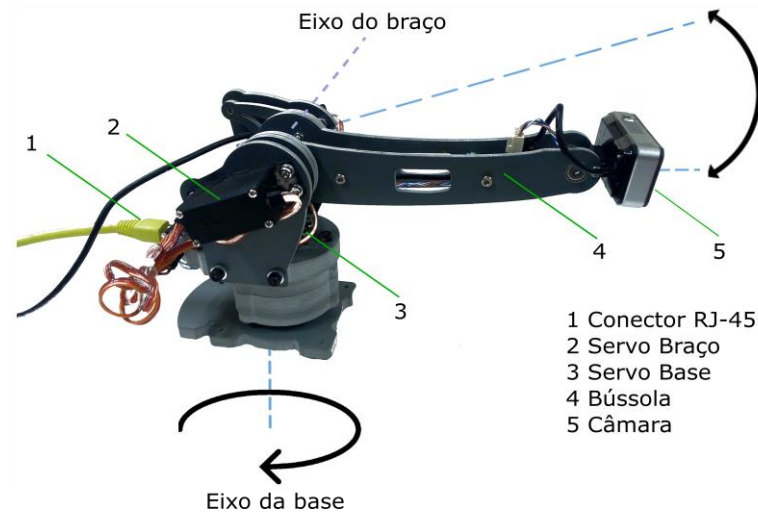


Figura 4.5: Representação dos eixos de rotação do robô.

É possível ainda verificar a existência da bússola e da câmara montadas no braço do robô, sendo que última se encontra localizada na extremidade deste, ponto geralmente denominado de *Tool Center Point* (TCP) ou ponto central da ferramenta.

A bússola e a câmara devem encontrar-se perfeitamente alinhadas de forma a minimizar o erro de seguimento e permitir a veracidade dos dados adquiridos, como explicado em 5.1. Assim o eixo *Roll* da bússola deverá coincidir com o vetor normal ao plano frontal da câmara, apresentando o mesmo sentido e direção (ver Figura 4.6).

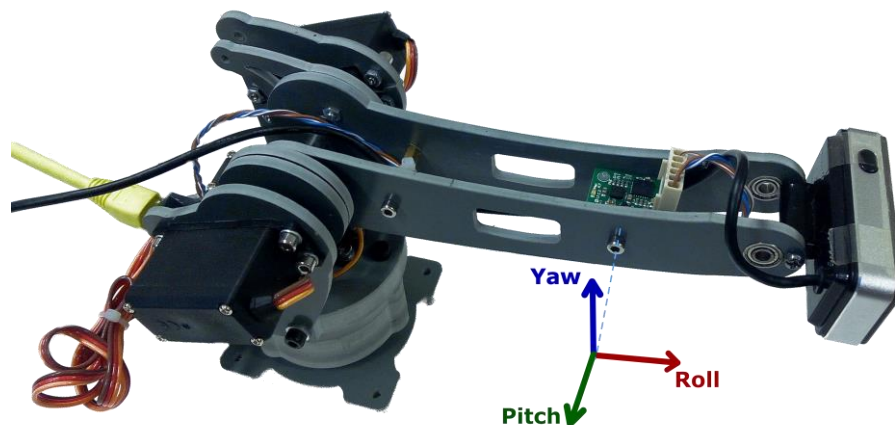


Figura 4.6: Referencial da bússola face à câmara e base do robô.

Comunicação entre os vários módulos do sistema

Como o sistema comporta por vários módulos, este dispõe de vários tipos de comunicação, esquematizados na Figura 4.7. Ao utilizar o Arduino como gestor de periféricos, a comunicação com o computador é efetuada através de uma ligação série USB. A bússola e o GPS comunicam também com o Arduino através de comunicações série, usando protocolos de comunicação distintos, I2C e Rx/Tx, nomeadamente. Por fim, a comunicação entre Arduino e os servomotores é feita usando modulação da largura de impulsos ou *Pulse Width Modulation* (PWM).

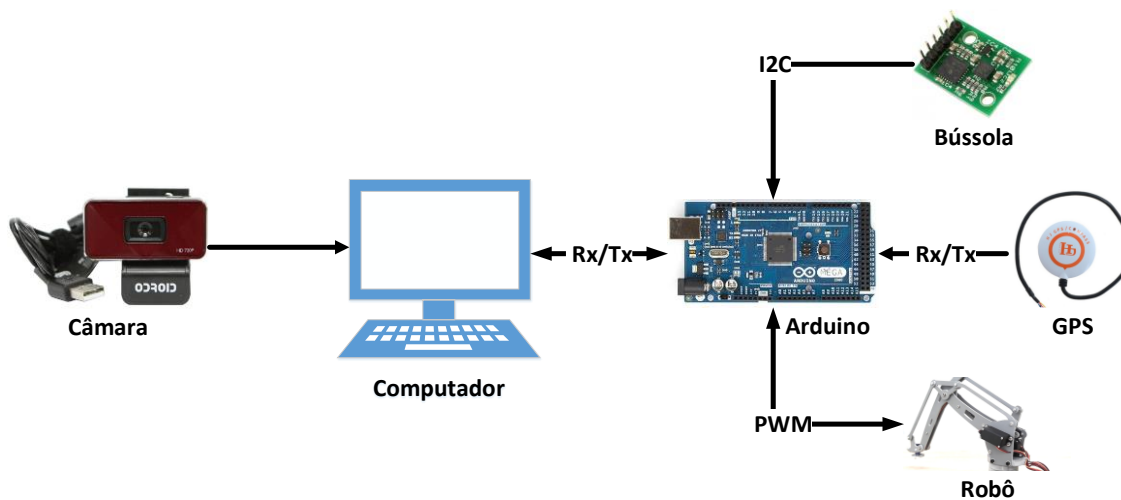


Figura 4.7: Comunicação entre os vários módulos do sistema de seguimento.

Otimização física

Foram ainda realizados alguns ajustes de forma a otimizar o desempenho do sistema. A introdução de um condensador eletrolítico aos terminais de alimentação dos servomotores permite a suavização dos picos de corrente e consequente queda de tensão provocada por estes na porta USB. Que de outra forma poderia comprometer a ligação entre Arduino e a bússola, traduzindo-se na perda de dados.

Para tornar o sistema mais robusto e fácil de transportar foram adicionadas tomadas de rede RJ-45 tanto no robô como na placa de prototipagem, permitindo ainda um aumento da distância entre estes. A disposição dos sinais no cabo encontra-se descrita na Figura 4.8.

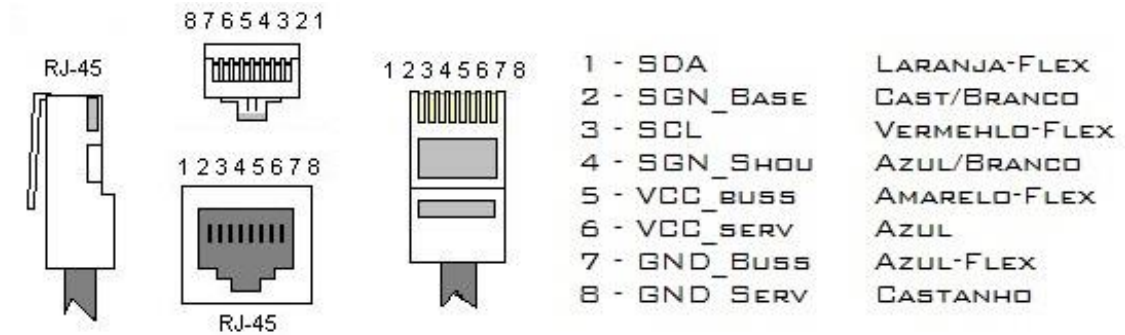


Figura 4.8: Distribuição dos pinos no cabo RJ-45 e na tomada da placa de prototipagem.

4.5 Controlador

Neste subcapítulo são apresentados os algoritmos que compõem o controlador. Particularmente, as estratégias de seguimento com base nos formalismos matemáticos e em processamento de imagem; os modos de seguimento solar autónomo com e sem memória.

Seguimento baseado em equações matemáticas

No seguimento baseado em equações matemáticas é feito o cálculo em tempo real da posição do Sol face ao ponto de observação, como referido em 4.2.2. Necessitando de alguns parâmetros como a data, hora e localização geográfica, enviados por comunicação série do Arduino para o computador, o cálculo teórico só se efetua caso os dados provenientes da comunicação série sejam válidos. Sendo posteriormente calculada a diferença entre a orientação teórica e a orientação real do robô, uma vez superior ao limite definido pelo utilizador, é efetuado o ajuste da direção do robô, conduzindo-o de acordo com o resultado teórico. O ajuste pode ser feito individualmente, ajustando apenas um dos eixos de seguimento; ou de forma concorrente, ajustando os dois eixos em simultâneo se necessário. A Figura 4.9 sintetiza o algoritmo anteriormente explicado.

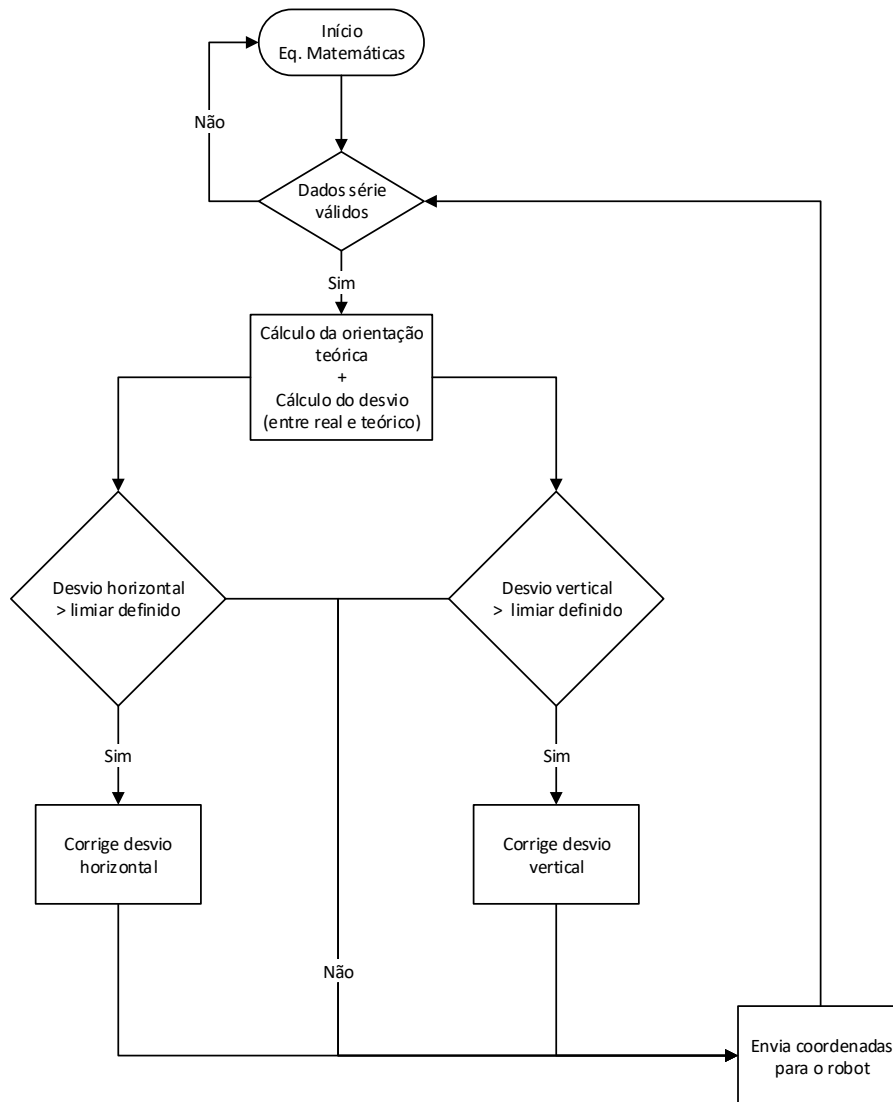


Figura 4.9: Representação do algoritmo de seguimento baseado em equações matemáticas.

Seguimento baseado em processamento de imagem

No seguimento baseado em processamento de imagem, inicialmente faz-se a recolha da imagem através da câmara Odroid mencionada em 4.3.1. De seguida utiliza-se o método de OTSU de forma a escolher o tom de cinzento que melhor destaca o Sol na imagem adquirida, o tom de cinzento calculado é posteriormente utilizado na binarização. Depois desta o Sol surge a branco ao contrário do resto da imagem, estando então em condições para efetuar a contagem e assim identificar o centro do Sol.

O desvio de seguimento tem por base a distância euclidiana entre o centro do Sol e o centro da imagem. Esta distância pode ser decomposta em duas componentes ortogonais, donde resultam

os desvios vertical e horizontal, exibidos na Figura 4.10. Caso estes sejam superiores ao limite definido pelo utilizador, é efetuado o ajuste da orientação do robô como descrito no seguimento baseado em equações matemáticas.

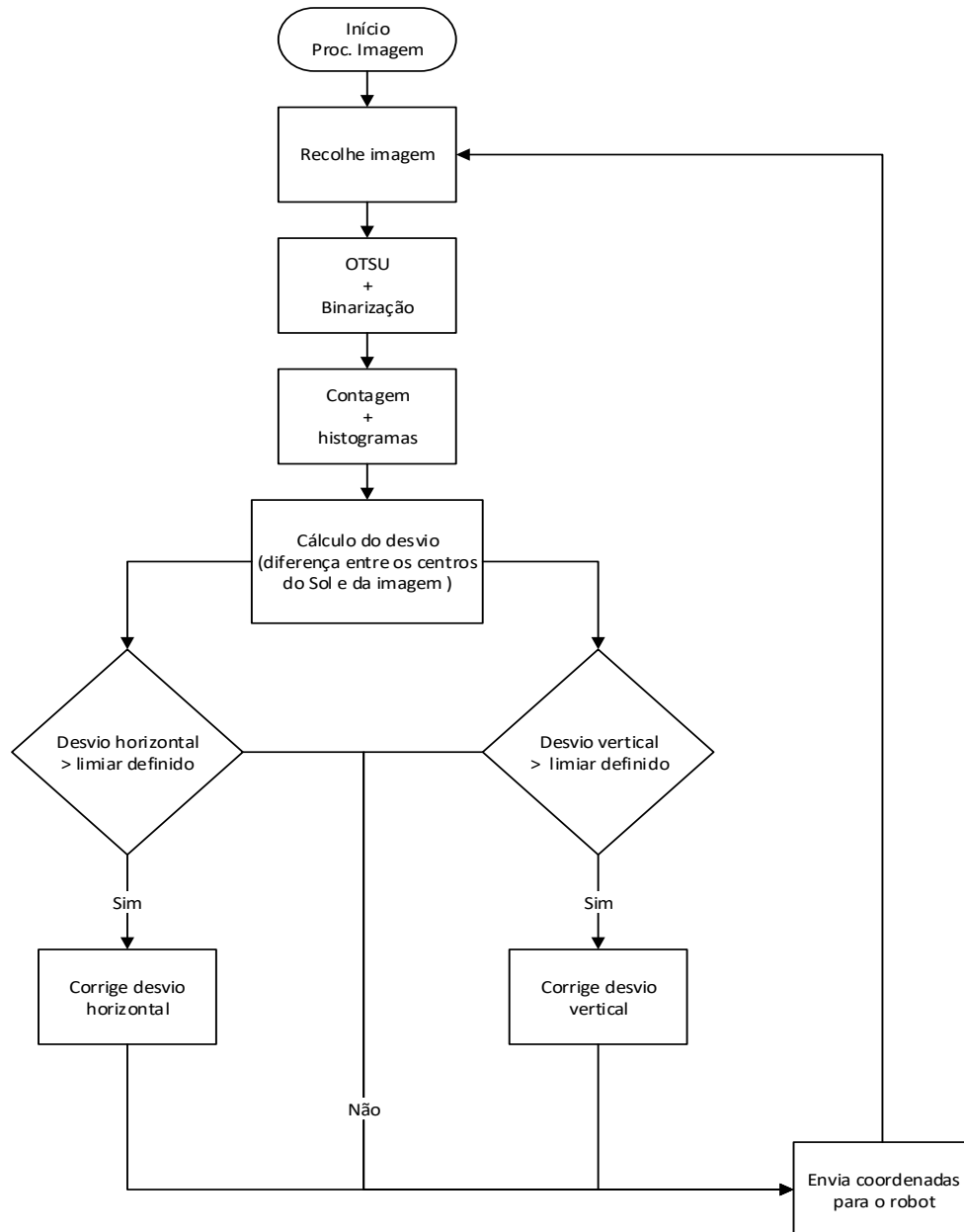


Figura 4.10: Representação do algoritmo de seguimento baseado em processamento de imagem.

Os algoritmos de correção de desvio de seguimento presentes na Figura 4.11, analisam a diferença entre a orientação de destino (calculada *à priori*) e a orientação atual do robô indicada pela bússola. Uma vez analisada, caso a diferença seja negativa, a posição de destino toma o valor da orientação atual, ao qual é subtraído 1° (deslocando o robô para a esquerda no sentido

horizontal ou para baixo no sentido vertical). Caso contrário a posição de destino tomará o valor da orientação atual, sendo adicionado 1° à *posteriori* (deslocando o robô para a direita no sentido horizontal ou para cima no sentido vertical). A adição ou subtração de 1° prende-se pelo fato dos servomotores apresentarem um passo de 1° . Assim em cada iteração, o algoritmo permite a redução de 1° no erro de seguimento em cada eixo, ocorrendo esta num período de 1 segundo, de forma a permitir a correta leitura da posição atual.

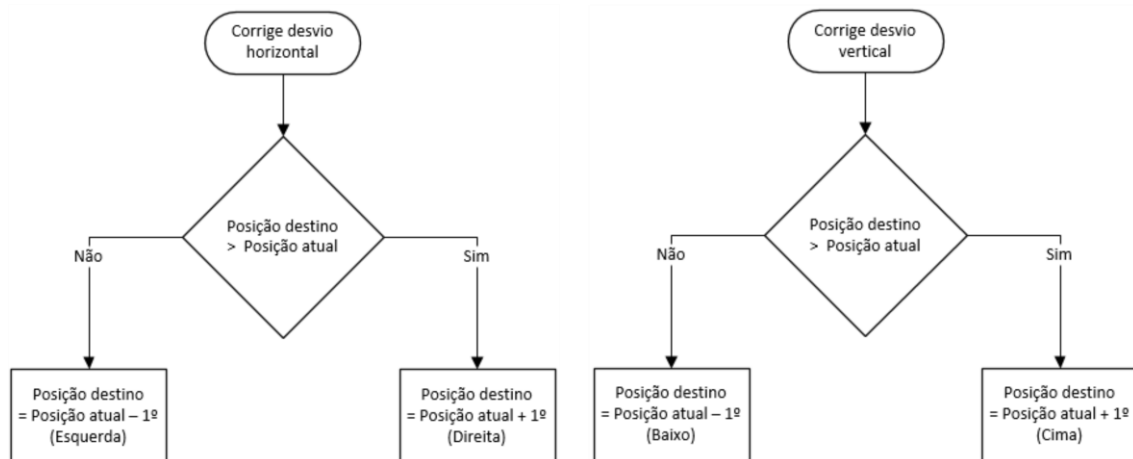


Figura 4.11: Fluxograma do algoritmo de desvio.

Modo de seguimento autónomo

O modo autónomo começa por verificar a validade dos recursos necessários à operação do sistema, nomeadamente a existência de dados série válidos e a operabilidade da câmara. Como exemplificado na Figura 4.12, o algoritmo só prossegue caso existam dados de série válidos. A verificação da disponibilidade da câmara permite decidir a estratégia de seguimento, podendo esta basear-se em formalismos matemáticos ou em processamento de imagem, explicados anteriormente. Ao longo da execução do programa a deteção do Sol permite também decidir a estratégia de seguimento, recorrendo ao processamento de imagem caso haja deteção do Sol ou às equações matemáticas, caso contrário.

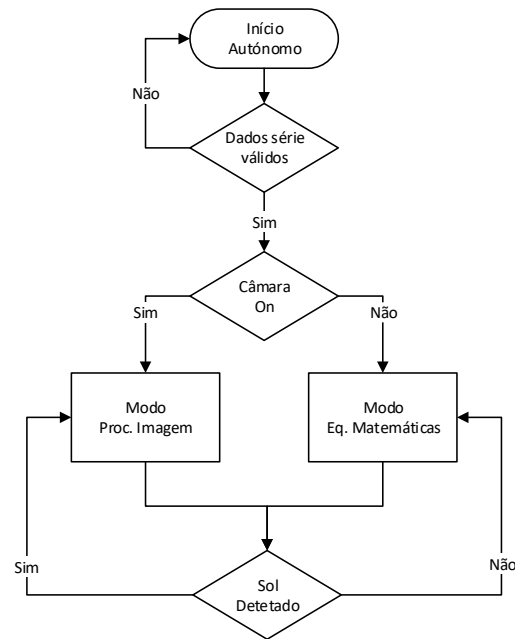


Figura 4.12: Fluxograma do modo autónomo.

Modo de seguimento autónomo com memória

O modo de seguimento autónomo com memória, presente na Figura 4.13, segue o princípio do modo autónomo. No entanto, este permite colmatar algumas imprevisibilidades que podem surgir no seguimento: nomeadamente a ausência repentina do Sol ou o surgimento de uma segunda fonte luminosa na imagem, resultante de uma nuvem retro iluminada pelo Sol ou da reflexão dos raios solares em transportes aéreos como aviões.

Assim, no instante em que se deteta a ausência do foco luminoso são guardadas a orientação e hora atuais do robô, adotando a partir desse momento a estratégia de seguimento baseada em equações matemáticas. Até ao reaparecimento da fonte luminosa, em cada iteração é calculado o andamento previsível do Sol com base na hora atual, sendo enviada ao robô a orientação resultante da soma da posição em que se detetou a perda, com o andamento expectável anteriormente referido. Portanto, quando o Sol surgir de novo na imagem, o robô deverá permanecer corretamente orientado.

Por outro lado, enquanto houver um foco luminoso nas figuras captadas pela câmara, o desvio entre este e o centro da imagem é guardado num histórico de tempo definido pelo utilizador. Desta forma, o seguimento de um segundo foco luminoso ou do foco atual com andamento superior à média de desvios contidos no histórico será limitado, sendo enviadas ao robô apenas coordenadas que sigam o andamento expectável resultante da média dos movimentos anteriores.

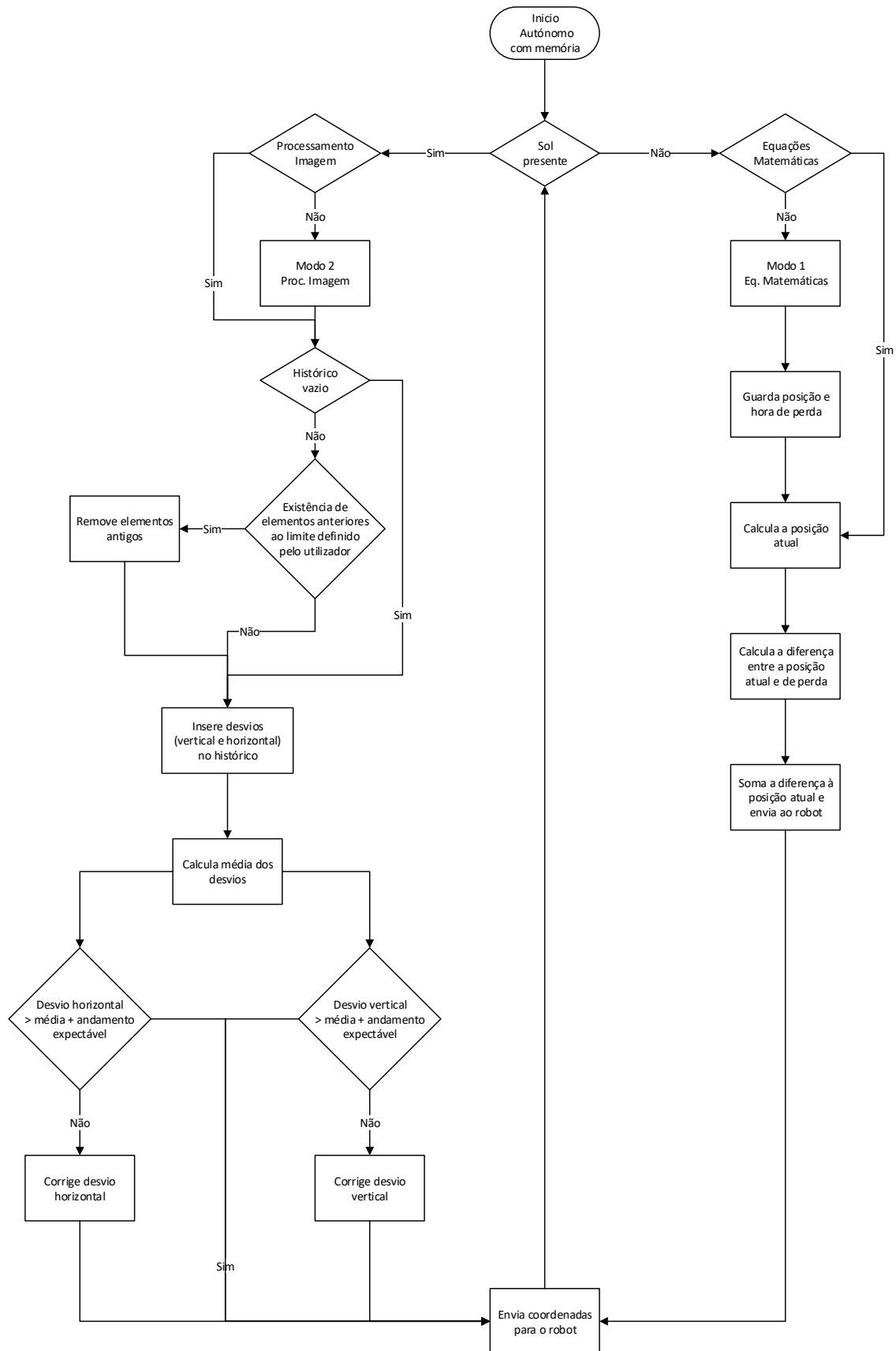


Figura 4.13: Fluxograma do modo autónomo com memória.

4.6 Aplicação informática

A aplicação composta por uma interface gráfica desenvolvida em C#, permite ao utilizador configurar o robô, gerir e analisar a informação recolhida em tempo real pelos sensores presentes no sistema de seguimento. A escolha da linguagem C# em deterioramento de Java para desenvolvimento da interface gráfica, prende-se com o fato do C# apresentar um menor tempo de processamento no tratamento das imagens captadas.

A interface presente na Figura 4.14, possibilita ao utilizador a gestão da câmara instalada no robô, apresentado ainda informação relativa à imagem captada em tempo real. É possível assim visionar o limiar da binarização aplicado à imagem denominado de *OTSU Threshold*, o desvio em píxeis entre o centro da imagem e o ponto correspondente ao centro do Sol, e ainda a contagem vertical e horizontal de píxeis brancos que permitem encontrar o centro do Sol na imagem, como referido em 4.3.2.

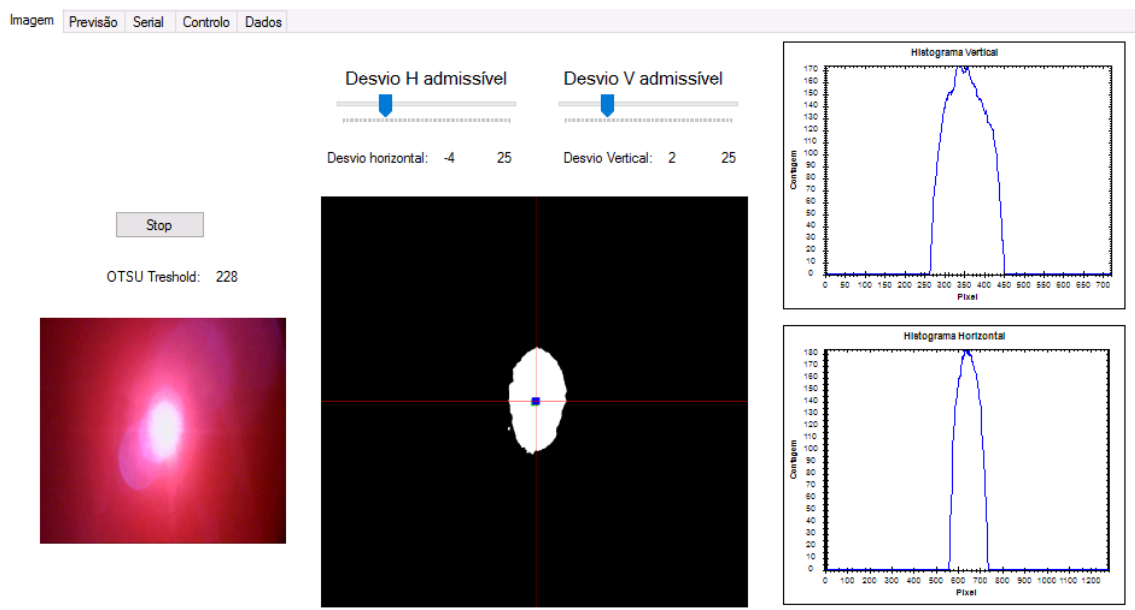


Figura 4.14: Interface do utilizador (Processamento de imagem).

A Figura 4.15 exibe a página da interface responsável por mostrar ao utilizador a informação resultante dos formalismos matemáticos explicados em 4.2.2, nomeadamente o ângulo de azimuth e inclinação teórica expectáveis para a data, hora e localização atual, obtidas através do módulo

GPS. A localização é visível na janela recorrendo a uma ferramenta (API)⁵ baseada nos mapas da *Google*. Com o intuito de aumentar a interação com o utilizador, a marcação do campo *Heading Orientation* permite a rotação da imagem de acordo com a orientação real do robô, garantindo uma melhor perceção da orientação atual do seguidor solar.

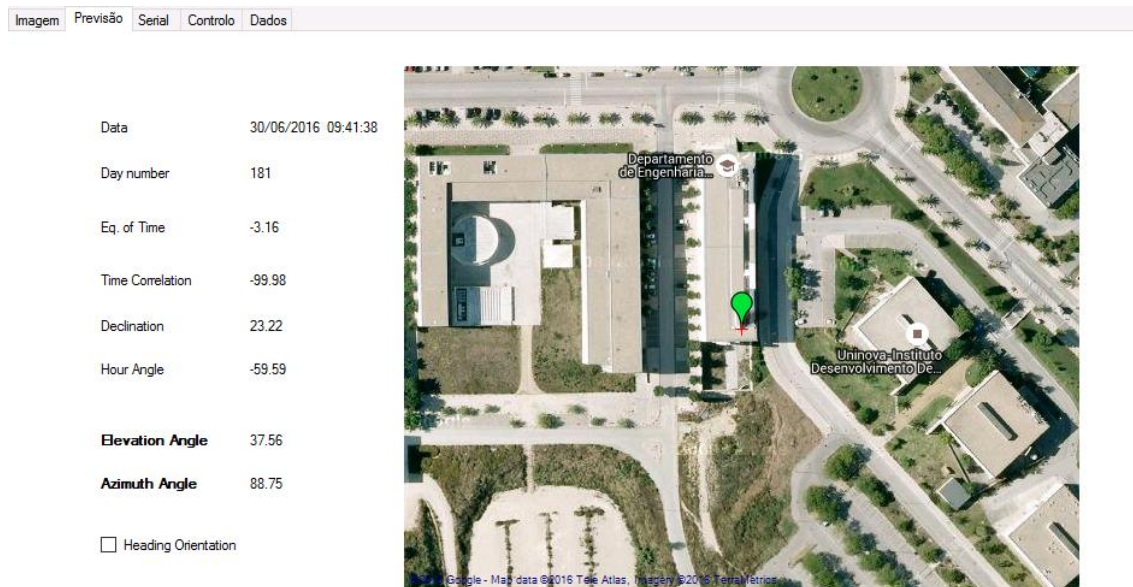


Figura 4.15: Interface do utilizador (Resultados matemáticos e localização GPS).

A aba *Serial* permite visualizar os dados da comunicação série, provenientes do Arduino. Nela são visíveis a data e hora atual, as coordenadas geográficas: latitude e longitude, o número de satélites disponíveis e por fim a orientação real do TCP do robô, descrita pela componente horizontal *Heading* e vertical *Inclinação*, ver Figura 4.16.

⁵ API – Interface de programação de aplicações, permite a integração dos serviços e funcionalidades de um *software*, estendendo as funcionalidades do programa onde se encontra implementado.

Imagem Previsão Serial **Dados**

Satélites disponíveis 9

COM5

115200

Close

Data e Hora	Latitude	Longitude	Heading	Inclinação
06/30/2016 09:42:25	38.660164	-9.204832	80.1	36
06/30/2016 09:42:25	38.660164	-9.204832	80.7	36
06/30/2016 09:42:24	38.660164	-9.204832	80.7	36
06/30/2016 09:42:24	38.660164	-9.204832	80.7	36
06/30/2016 09:42:24	38.660164	-9.204832	80.4	36
06/30/2016 09:42:23	38.660164	-9.204832	80.4	36
06/30/2016 09:42:23	38.660164	-9.204832	80.4	36
06/30/2016 09:42:23	38.660164	-9.204832	80.1	36
06/30/2016 09:42:22	38.660164	-9.204831	80.1	36
06/30/2016 09:42:22	38.660164	-9.204831	80.1	36
06/30/2016 09:42:22	38.660164	-9.204831	80.5	36
06/30/2016 09:42:22	38.660164	-9.204832	80.5	36

Figura 4.16: Interface do utilizador (Informação resultante da comunicação série).

A aba de controlo presente na Figura 4.17 possibilita o controlo manual do robô, onde o utilizador poderá alterar a orientação e a velocidade de movimento deste. Nesta aba o usuário poderá ainda escolher um dos modos de funcionamento do seguidor: Autónomo, Interativo e Autónomo com memória, explicados anteriormente em 4.5.

Imagem Previsão Serial **Controlo** Dados

☐ Modo Manual
☐ Modo Matemático
☒ Modo Imagem

Autónomo

Memória (min)

Θ1: Base 90
 Θ2: Shoulder 5
 Velocidade

Figura 4.17: Interface do utilizador (Controlo do robô e escolha do modo de funcionamento).

A aplicação possibilita a comparação das orientações teórica e real obtida pela bússola, calculando em tempo real do erro de seguimento em cada eixo, exibindo ainda o histórico deste sob a forma de gráfico, visível na aba representada pela Figura 4.18. Esta aba permite também ao utilizador estabelecer o limite de erro admissível no seguimento solar e o controlo do envio dos dados para a plataforma *ThingSpeak*⁶. Em alternativa, o sistema possibilita a criação de um ficheiro de dados local para o registo da informação recolhida.

⁶ *ThingSpeak* é uma plataforma *online* que permite recolher, armazenar, analisar e visualizar os dados de provenientes de sensores.

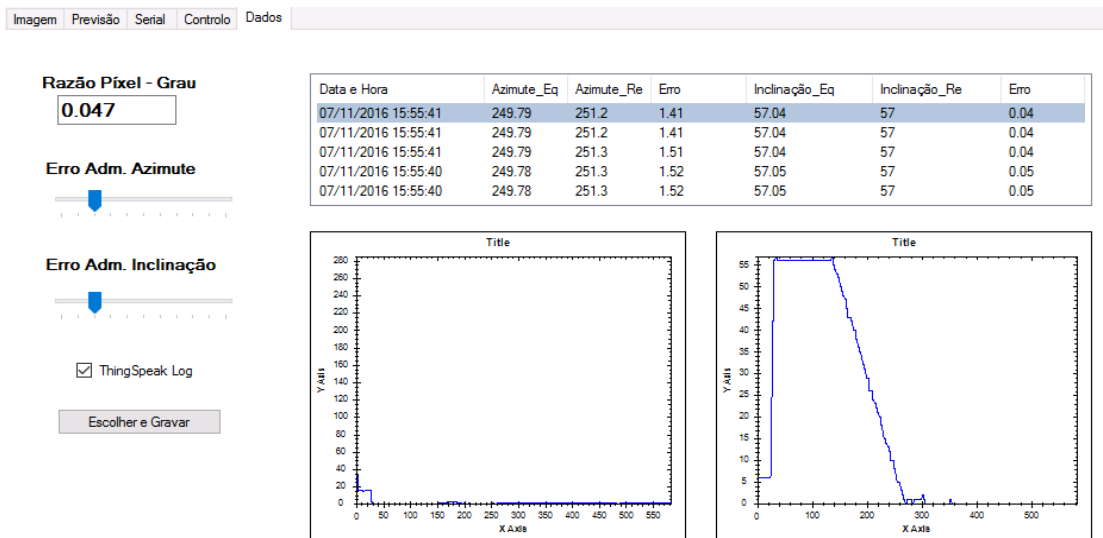


Figura 4.18: Interface do utilizador (Informação associada ao erro de seguimento).

Arquitetura de comunicação com o utilizador

Como se pretende a implementar o sistema no exterior, deve limitar-se o uso de periféricos com o intuito de o proteger do ambiente hostil onde se encontra inserido. Desta forma, a ligação do sistema de seguimento na rede de comunicação do parque solar, permite o controlo remoto deste e monitorização dos dados em tempo real. A Figura 4.19, possibilita a perceção da arquitetura de comunicação implementada.

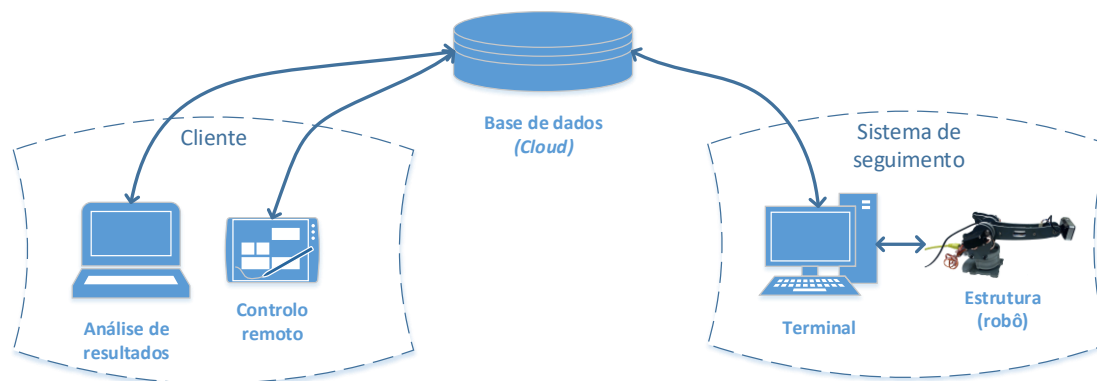


Figura 4.19: Arquitetura de comunicação implementada no sistema.

A comunicação entre o terminal e o robô consiste numa ligação física usando comunicação série, já a comunicação do terminal ou dos clientes com a base de dados rege-se por protocolos de comunicação em rede, como HTTP e RDP (protocolo de *desktop* remoto).

4.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um sistema de seguimento solar baseado em duas estratégias de seguimento distintas, que se complementam permitindo a operação deste em vários cenários.

Foram necessários alguns ajustes a nível de *software* para reconfiguração de sensores como o GPS que possuía configurações de fábrica incompatíveis com o microcontrolador utilizado. Foram também realizadas otimizações a nível de *hardware* que permitiram a proteção do sensor de imagem, através da aplicação do filtro e a redução de ruído na comunicação série pela introdução de um condensador em paralelo com os terminais dos servomotores.

Após a montagem da estrutura e instalação dos respetivos sensores, desenvolveu-se a aplicação informática responsável pela implementação dos algoritmos que constituem o controlador. Por fim procedeu-se à otimização gráfica da aplicação, possibilitando ainda a gestão remota do sistema de seguimento e análise dos dados recolhidos.

Procedimento e análise de resultados

Serve o presente capítulo para demonstrar os procedimentos que permitiram a calibração do sistema de seguimento e que possibilitaram encontrar a razão entre píxeis e graus, de forma a normalizar os dados para posterior análise. Neste capítulo, tem ainda lugar a análise de resultados, que permitirá a validação do sistema implementado através testes realizados aos diversos módulos que o compõem, bem como aos métodos de seguimento, no qual o sistema se baseia. Por fim, é feita a comparação do seu desempenho com outros sistemas referidos na literatura.

5.1 Calibração

O sistema de seguimento assenta em dois tipos de seguimento distintos como descrito em 4.5. Para um correto funcionamento deste é necessário que a bússola e a câmara estejam precisamente alinhadas, sendo desta forma necessário calibrar os vários componentes do sistema.

Calibração da bússola

- Ligar o foco luminoso, afastando-o da zona de calibração;
- Alinhar a zona de calibração com o foco luminoso utilizando uma bússola devidamente calibrada. O ponto a Norte da zona de calibração deverá coincidir com o foco luminoso;
- Apertar firmemente os parafusos que fixam a bússola à estrutura do robô.

Calibração vertical da câmara

- Colocar o robô na posição horizontal;
- Alinhar a bússola até atingir 0 graus de inclinação;
- Ligar o foco luminoso, afastando e dispondo-o à mesma altura da câmara;
- Alinhar a câmara verticalmente com o foco luminoso até obter um desvio vertical nulo.

Calibração horizontal da câmara

- Alinhar o robô a Sul até obter 0 graus de orientação;
- Afastar e alinhar o foco luminoso com o robô;
- Alinhar a câmara horizontalmente com o foco luminoso até obter um desvio horizontal nulo;
- Apertar firmemente os parafusos de suporte, de forma a impedir o desvio da câmara no transporte e no serviço.

Após a realização dos procedimentos acima referidos, o sistema encontra-se calibrado, garantindo a coerência dos dados provenientes dos sensores, no sistema implementados.

5.2 Conversão entre número de píxeis e ângulo

Na eventualidade do seguimento solar apresentar um desvio devido a limitações físicas do robô, tratando-se de processamento de imagem, este desvio será apresentado sob a forma de número de píxeis. De forma a manter a uniformidade dos dados foi necessário converter o número de píxeis em graus, o que facilitará a análise de resultados aquando o seu tratamento, usando apenas graus como unidade.

5.2.1 Método A - *Deslocamento do foco luminoso*

Para encontrar a razão entre píxeis e graus foi efetuado o seguinte procedimento experimental, tendo por base a montagem da Figura 5.1.

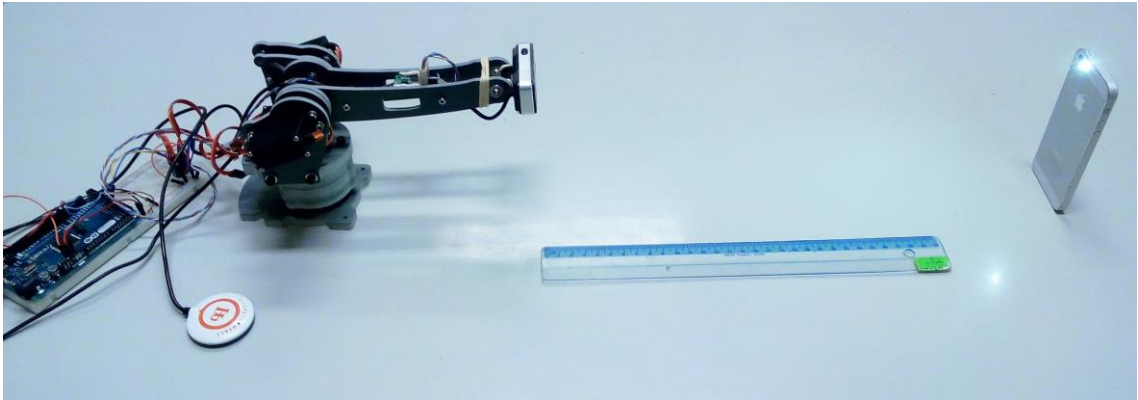


Figura 5.1: Montagem experimental.

Procedimento experimental para determinar a razão de desvio horizontal:

- Efetuar a montagem segundo a Figura 5.1;
- Calibrar o robô como descrito no subcapítulo 5.1;
- Ligar o foco luminoso, afastando este 125 cm do plano vertical do robô;
- Alinhar o foco com o robô até anular o desvio horizontal;
- Deslocar o foco luminoso para a esquerda, registrando o desvio horizontal e distância entre o ponto de desvio nulo e o ponto atual, conforme d presente na Figura 5.2;
- Repetir o ponto anterior até atingido o limite horizontal da imagem captada pelo robô.

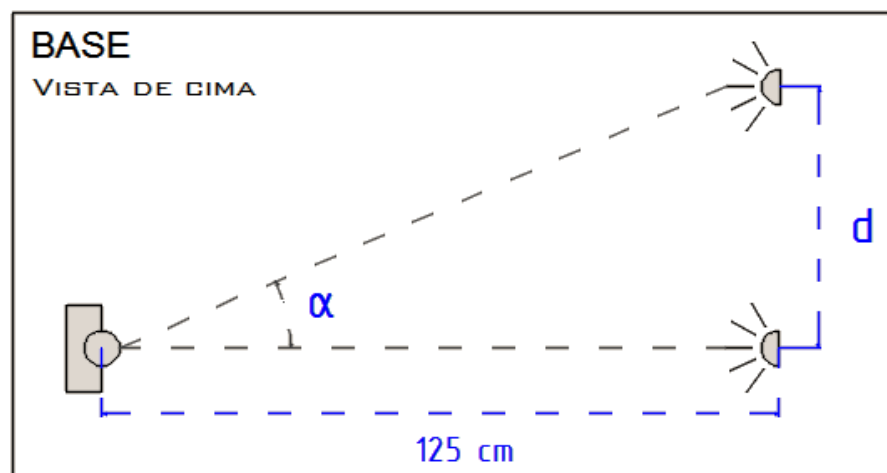


Figura 5.2: Projeção ortogonal, vista de cima da montagem A.

Dado que os planos verticais da câmara e do foco luminoso distam de 125 cm, correspondendo ao cateto adjacente na Figura 5.2, foi possível calcular os dados presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Correlação entre desvio horizontal, ângulo de desvio e número de píxeis.

Cat. Oposto [cm]	Ângulo α [°]	Píxeis
11,5	5,3	105
26,5	12,0	245
41,5	18,4	386
49	21,4	436
56,5	24,3	512
67,5	28,4	617

Após a construção da Tabela 5.1: com os resultados obtidos experimentalmente traçou-se o gráfico da Figura 5.3, o declive da regressão linear corresponde à razão entre número de píxeis e ângulo de desvio horizontal.

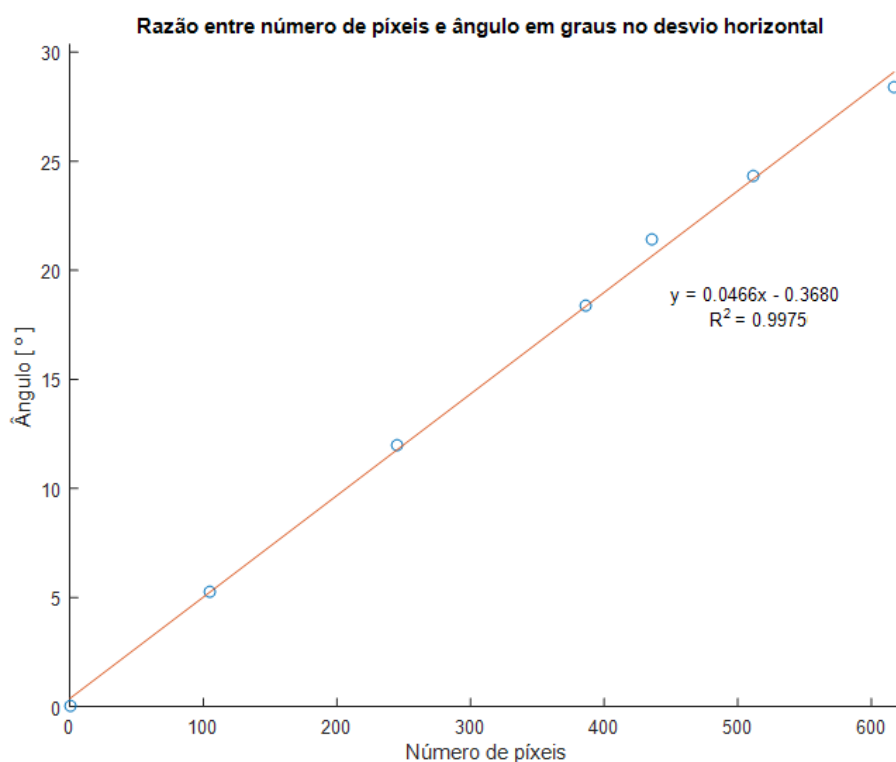


Figura 5.3: Razão entre número de píxeis e ângulo de desvio horizontal, resultante da montagem A.

Pôde concluir-se assim que neste método, o desvio de um píxel corresponde a um desvio de 0,0466 ° no plano horizontal.

De forma a calcular a razão de desvio vertical, tendo por base a mesma montagem, efetuou-se o seguinte procedimento experimental:

Procedimento experimental para determinar a razão de desvio vertical:

- Efetuar a montagem segundo a Figura 5.1;
- Calibrar o robô como descrito no subcapítulo 5.1;
- Ligar-se o foco luminoso, afastando este 168 cm do plano vertical do robô;
- Alinhar o foco com o robô até anular o desvio vertical;
- Deslocar o foco luminoso para cima, registrando o desvio vertical e distância entre o ponto de desvio nulo e o ponto atual, conforme h presente na Figura 5.4;
- Repetir o ponto anterior até atingido o limite vertical da imagem captada pelo robô.

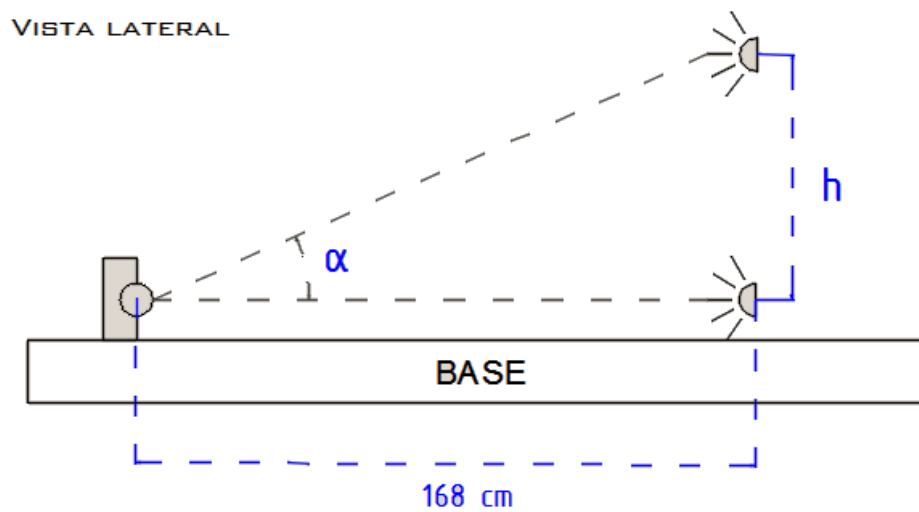


Figura 5.4: Projeção ortogonal, vista lateral da montagem A.

Como o plano da câmara se encontra a 168 cm do foco luminoso, correspondendo ao cateto adjacente e sabendo que a câmara se encontra a 11,5 cm do plano da base, foi possível contruir a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Correlação entre desvio vertical, ângulo de desvio e número de píxeis.

Medido [cm]	Cat. Oposto [cm]	Ângulo α [°]	Píxeis
15	3,5	1,2	30
20	8,5	2,9	66
30	18,5	6,3	136
38	26,5	9,0	190
45	33,5	11,3	240

Medido [cm]	Cat. Oposto [cm]	Ângulo α [°]	Píxeis
50,5	39	13,1	270
55	43,5	14,5	314
60	48,5	16,1	347

Para encontrar a razão entre ângulo e píxeis no desvio vertical, traçou-se a reta da Figura 5.5.

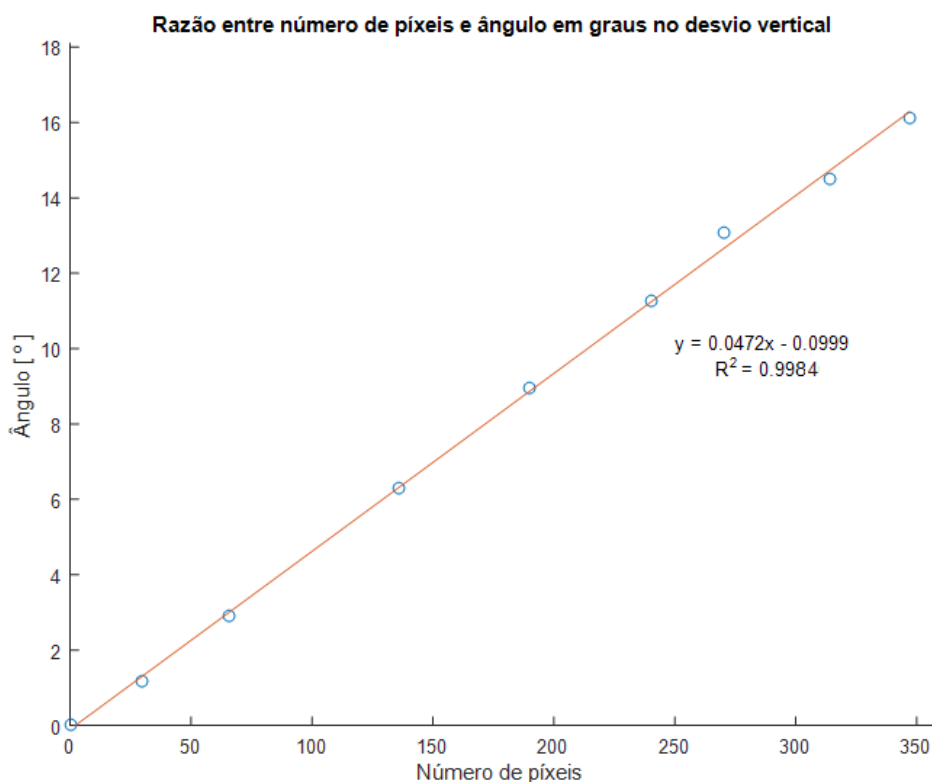


Figura 5.5: Razão entre número de píxeis e ângulo de desvio vertical, resultante da montagem A.

Como o declive da regressão linear corresponde à razão entre número de píxeis e ângulo de desvio vertical, pode afirmar-se que segundo este método, o desvio de um píxel corresponde a um desvio de $0,0472^\circ$ no plano vertical.

5.2.2 Método B - *Deslocamento da câmara*

Pelo fato da metodologia apresentada em 5.2.1 conter medidas indiretas de grandezas como o ângulo entre a normal ao plano da câmara e o vetor do foco luminoso, a razão entre graus e píxeis tem, a si associada, uma maior incerteza. De forma a encontrar uma razão com menor incerteza associada, foram realizados procedimentos semelhantes aos anteriores, descritos de seguida.

Procedimento experimental para determinar a razão de desvio horizontal:

- Efetuar a montagem do robô e iniciar a aplicação de controle;
- Calibrar o robô como descrito no subcapítulo 5.1;
- Orientar o robô de forma a que o centro do Sol se encontre no extremo esquerdo da imagem captada;
- Registrar o desvio horizontal em píxeis e o ângulo (azimute) fornecido pela bússola;
- Atuar no robô, rodando-o para a esquerda de forma que o Sol se aproxime do centro da imagem, de acordo com a Figura 5.6;
- Repetir os dois pontos anteriores, deslocando gradualmente o robô até que o centro do Sol atinga o limite direito da imagem.

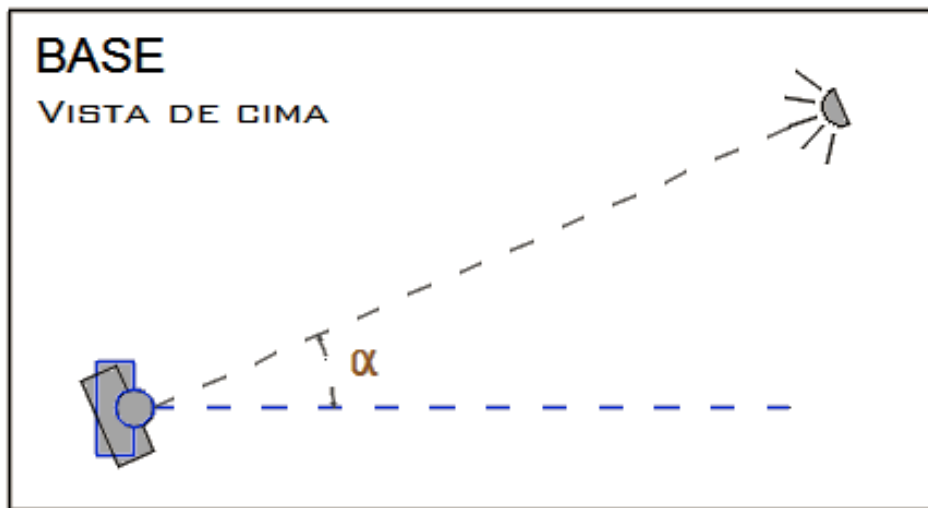


Figura 5.6: Projeção ortogonal, vista de cima da montagem B.

Registados os valores, foi possível contruir o gráfico da Figura 5.7 e o traçado uma curva de tendência linear, com declive correspondente à razão entre número de píxeis e ângulo de desvio horizontal.

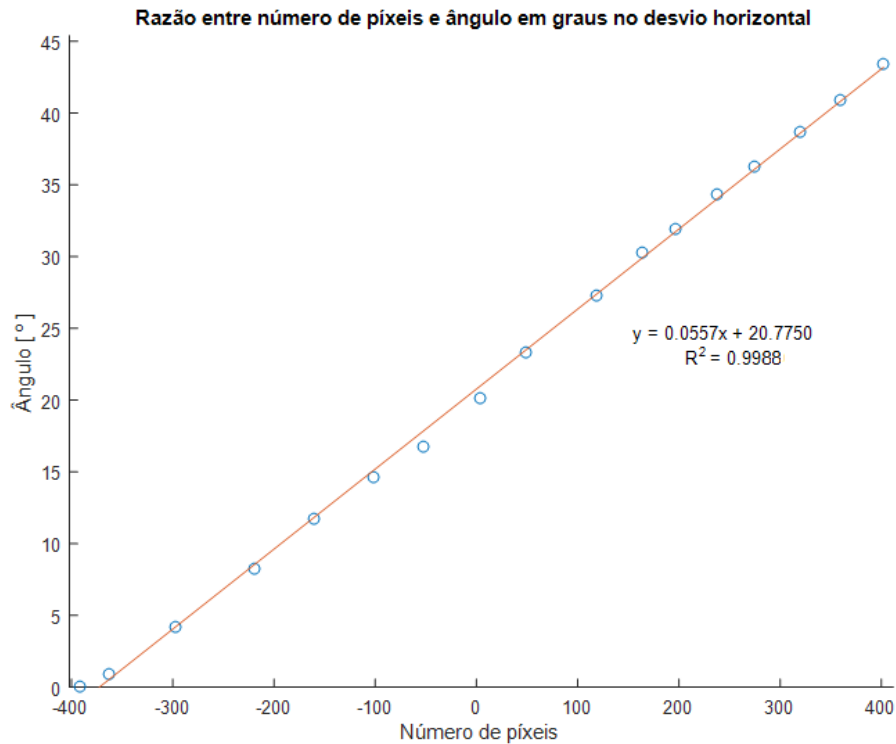


Figura 5.7: Razão entre número de píxeis e ângulo de desvio horizontal, resultante da montagem B.

Tendo em conta o declive da curva de tendência e o seu coeficiente de determinação, normalmente conhecido por *R-squared*, pôde afirmar-se que a curva de tendência define com precisão a razão pretendida, onde o desvio de 1 píxel corresponde a um desvio de 0.0557° em termos de desvio horizontal.

De forma a calcular a razão de desvio vertical, tendo por base o Método B - *Deslocamento da câmara*, efetuou-se o seguinte procedimento experimental:

Procedimento experimental para determinar a razão de desvio vertical:

- Efetuar a montagem do robô e iniciar a aplicação de controlo;
- Calibrar o robô como descrito no subcapítulo 5.1;
- Orientar o robô de forma a que o centro do Sol se encontre no extremo superior da imagem captada;
- Registrar o desvio vertical em píxeis e inclinação fornecida pela bússola;
- Atuar no robô, rodando-o para a cima de forma que o Sol se aproxime do centro da imagem, de acordo com a Figura 5.8;
- Repetir os dois pontos anteriores, deslocando gradualmente o robô até que o centro do Sol atinga o limite inferior da imagem.

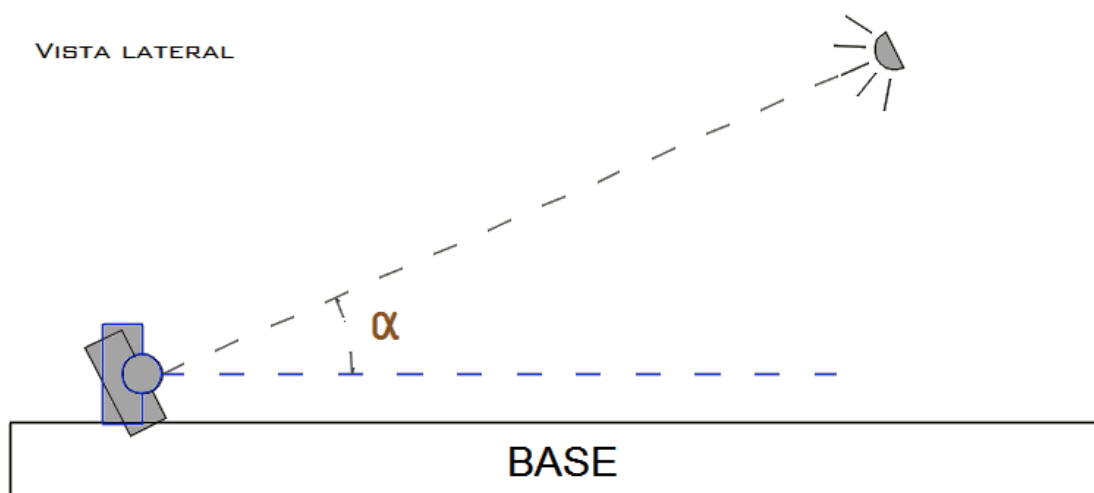


Figura 5.8: Projeção ortogonal, vista lateral da montagem B.

Tal como no procedimento para encontrar a razão de desvio horizontal, foram registados os dados de forma a contruir o gráfico da Figura 5.9, para determinação da razão entre píxeis e ângulo de desvio vertical.

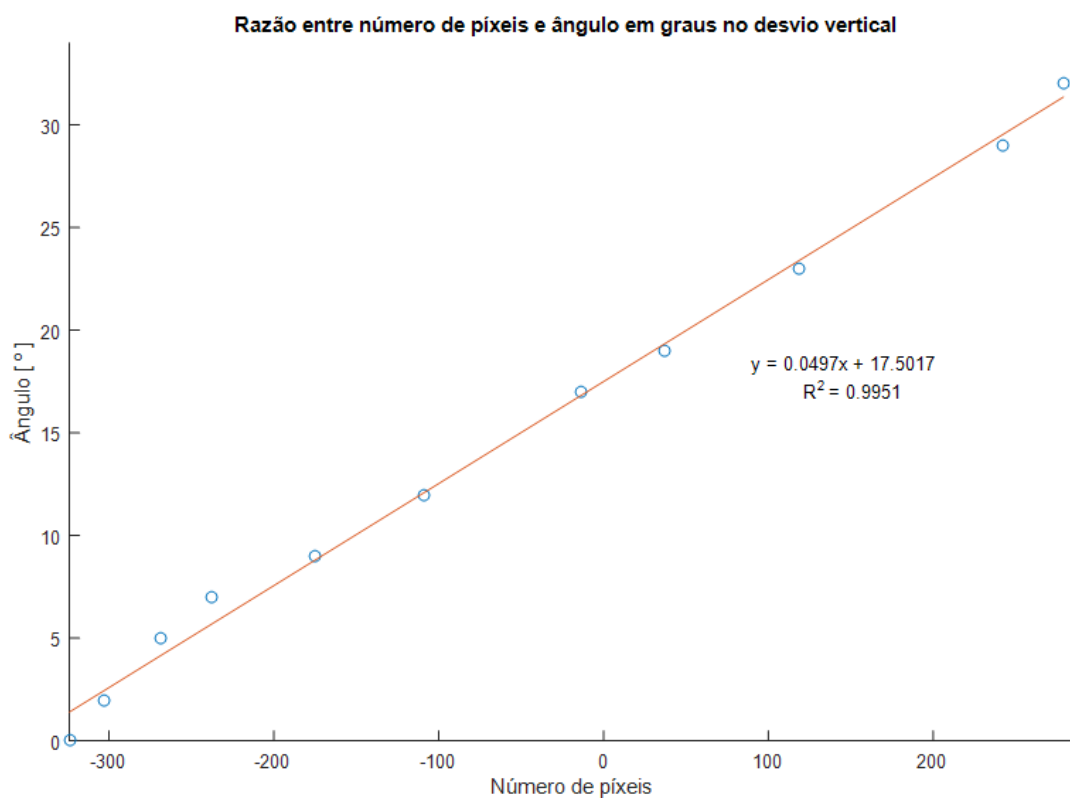


Figura 5.9: Razão entre número de píxeis e ângulo de desvio vertical, resultante da montagem B.

Após conhecer o declive da curva de tendência e o seu coeficiente de determinação, pôde afirmar-se que o desvio de 1 píxel corresponde a um desvio de 0.0497° em termos de desvio vertical, segundo este método.

5.2.3 Comparação de métodos

Como a incerteza (u) de uma medida direta se relaciona com resolução (δ) do aparelho de medida, diferindo caso este seja analógico ou digital segundo as equações 5.1 e 5.2, respetivamente (Silva 2011).

$$u(x) = \frac{\delta(x)}{2} \quad 5.1$$

$$u(x) = \delta(x) \quad 5.2$$

Tendo em conta os seguintes aparelhos de medida:

- Régua graduada em milímetros: resolução 0.1 cm – incerteza 0.05 cm;
- Bússola digital:
 - Medida horizontal: resolução 0.1° - incerteza 0.1° ;
 - Medida vertical: resolução 1° - incerteza 1° ;

E sabendo que a incerteza da medida indireta é calculada pela lei de propagação de incertezas, segundo a equação 5.3 (Silva 2011). Após o cálculo de incertezas diretas e indiretas, resulta a Tabela 5.3.

$$u(z) = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x} u(x)\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} u(y)\right)^2 + \dots} \quad 5.3$$

Tabela 5.3: Comparação das razões resultantes dos métodos A e B, e respectivas incertezas.

	Razão Horizontal ($^\circ$)	Incerteza Associada ($^\circ$)	Razão Vertical ($^\circ$)	Incerteza Associada ($^\circ$)
Método A	0.0466	0.0011	0.0472	0.0045
Método B	0.0557	0.0006	0.0497	0.0031

Depois de conhecer os coeficientes de determinação das curvas de tendência que produziram os valores da Tabela 5.3 e a incerteza direta ou indireta associada a cada um, adotou-se como critério de escolha, o valor com menor incerteza para a determinação das razões horizontal e vertical entre píxeis e ângulo de desvio. Desta forma, como razão entre píxeis e ângulo de desvio, resultam as razões obtidas pelo Método B - *Deslocamento da câmara*, pois apresentam menor incerteza associada.

$$R_h = (0.0557 \pm 0.0006)^\circ$$

$$R_v = (0.0497 \pm 0.0031)^\circ$$

Pelo que, ao desvio de um píxel na imagem corresponde um ângulo de 0.0557° em termos de desvio horizontal ou 0.0497° em termos de desvio vertical.

A escolha deste método prende-se ainda com o fato das medidas adquiridas para o cálculo da razão, não serem influenciadas pela distância focal⁷ da câmara, usando o Sol como foco luminoso. Ao contrário do Método A - *Deslocamento do foco luminoso*, em que o cálculo do ângulo tem por base a distância entre câmara e foco luminoso, podendo influenciar o diâmetro do foco, reduzindo a fidedignidade dos dados obtidos.

5.3 Análise de resultados

Como referido na introdução do capítulo: a análise de resultados, permitirá a validação do sistema implementado através de testes realizados aos diversos módulos que o compõem; fazendo ainda a comparação do seu desempenho com outros sistemas referidos na literatura consultada no desenvolvimento desta dissertação.

Com o intuito de analisar o desempenho do sistema de seguimento, foram desenvolvidos na interface em C#, procedimentos responsáveis pelo envio dos dados para a plataforma *ThingSpeak* referida anteriormente. Uma vez armazenados, o seu tratamento pôde ser realizado remotamente através de uma aplicação implementada em Matlab®, a qual permitiu o cálculo e construção dos gráficos apresentados ao longo deste subcapítulo.

⁷ A distância focal é uma descrição básica de uma lente fotográfica. Não é a medida real do comprimento da lente, mas o cálculo de uma distância ótica do ponto onde os raios de luz convergem para formar uma imagem nítida de um objeto no sensor, no plano focal da câmara. (Nikon Inc, 2016)

Erro de seguimento devido a limitações físicas da estrutura

Com o objetivo de analisar o erro de seguimento devido a limitações físicas do robô, foi realizado um teste em que a estratégia de seguimento teve por base os formalismos matemáticos para o cálculo da trajetória solar. Pois se trata de uma estratégia livre de imprevistos, ao contrário da metodologia baseada em processamento de imagem, onde podem surgir cenários inesperados, como a ausência do foco luminoso (Sol) ou a detecção de outros focos luminosos, provenientes de fenômenos de reflexão. Deste teste realizado no dia 20 de julho de 2016, resultaram os gráficos presentes na Figura 5.10 e Figura 5.11.

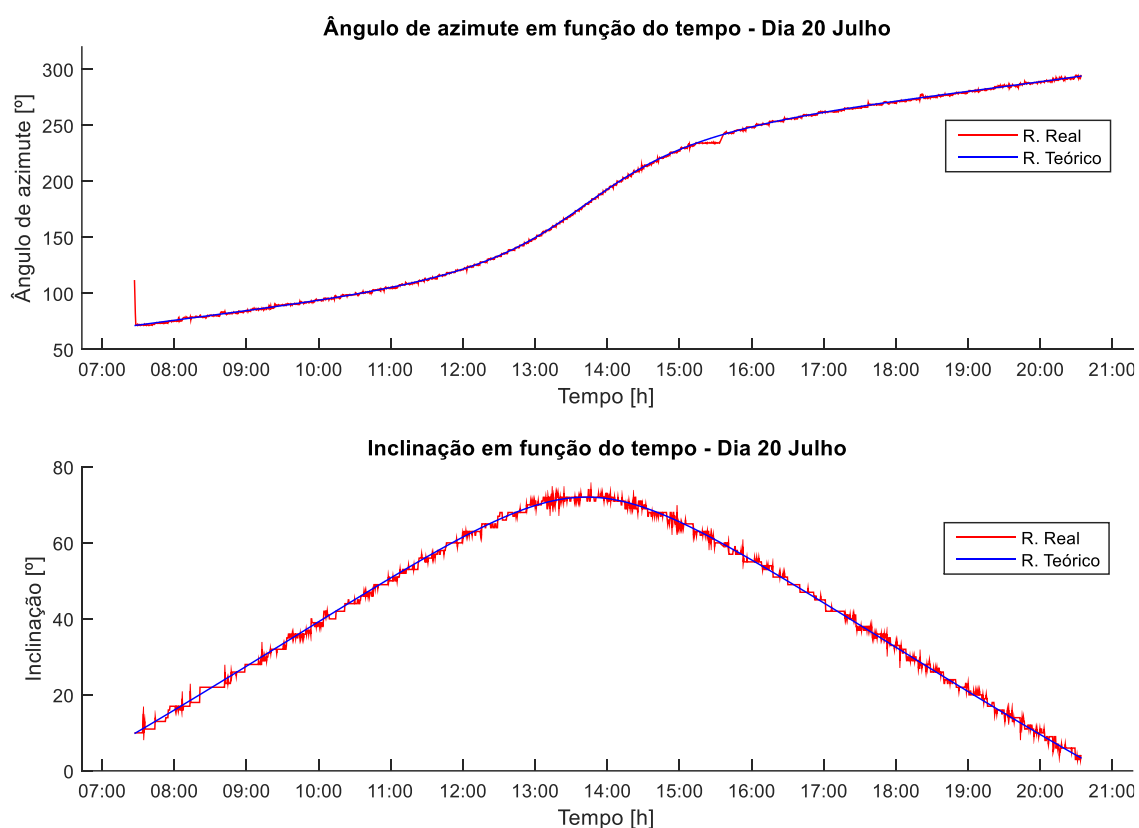


Figura 5.10: Andamento do robô ao longo do dia 20 de julho.

Sabendo que as curvas a azul representam a trajetória teórica do Sol, resultantes das equações matemáticas e as curvas a vermelho retratam o andamento real do robô, pode ver-se que no início houve uma desfasagem entre curvas pelo fato do robô estar em processo de alinhamento. A partir desse momento é visível um correto alinhamento ao longo do dia, retratado pelas linhas coincidentes.

A desfasagem entre curvas traduz-se no erro de seguimento, resultante do desvio entre o vetor normal ao plano frontal do robô (extremidade do TCP) e o vetor solar, visível na Figura 5.11.

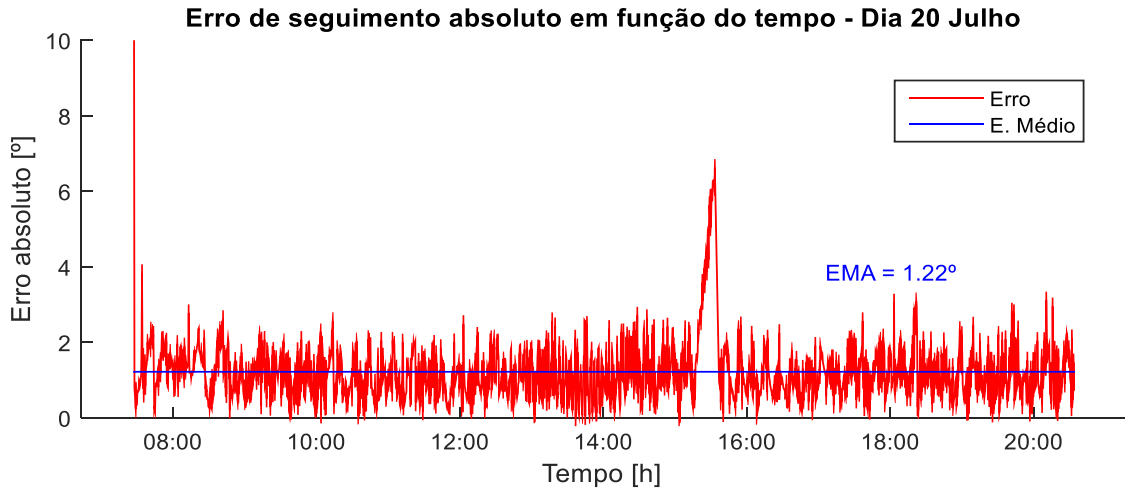


Figura 5.11: Desvio entre valores reais e teóricos no dia 20 de julho.

Este desvio pode ser positivo ou negativo, dependendo da orientação do robô à direita, esquerda, cima ou baixo do ponto da referência teórica. O desvio ou erro médio absoluto (EMA), representado pela reta azul, é calculado através da distância euclidiana (bidimensional) entre o ponto teórico e real em cada instante de tempo. Supondo que num dado instante o ponto $T = (t_h, t_v)$ corresponde à orientação teórica e o ponto $R = (r_h, r_v)$ corresponde à posição real do robô, o erro médio absoluto nesse instante é dado por 5.4:

$$EMA = \sqrt{(t_h - r_h)^2 + (t_v - r_v)^2} \quad 5.4$$

São visíveis na imagem dois desfasamentos isolados, o primeiro resultante do processo de alinhamento inicial ocorrido às 7.30h e um segundo, sucedido às 15.30h resultado de uma limitação física do robô. Pois sendo constituído por servomotores com um alcance de 180° (insuficiente para o acompanhamento da componente horizontal da trajetória solar), é necessário um ajuste manual da orientação do robô de forma a reposicionar o servomotor, para que este possa acompanhar o resto da trajetória sem que se aproxime de novo do seu limite ou alcance máximo.

Em suma, o erro médio absoluto obtido no teste realizado a 20 de julho, com o intuito de averiguar as limitações físicas do robô em termos de seguimento foi de 1.22°. Este deve-se ao fato dos servomotores possuírem um passo de 1°, impossibilitando um acompanhamento mais preciso da trajetória solar e ao fato da bússola apresentar uma resolução de 1° na leitura de inclinação, o que se traduz numa sobrevalorização do erro de seguimento vertical. Valor aceitável, uma vez

que, no pior caso (desvio de 1° em cada componente da trajetória), calculando a distância euclidiana, se obtém o valor de 1.41° .

Desempenho do sistema e sua comparação com resultados teóricos

Tendo em conta o erro de seguimento acima referido, resultante das limitações físicas do robô e da resolução da bússola em termos de inclinação, testaram-se os modos de seguimento autónomo (com e sem memória) em dias de céu limpo, tirando máximo partido do algoritmo de seguimento. Começou-se assim por testar o desempenho do modo de seguimento sem memória, para o qual se realizou um teste a dia 30 de junho de 2016, resultando os gráficos da Figura 5.12:

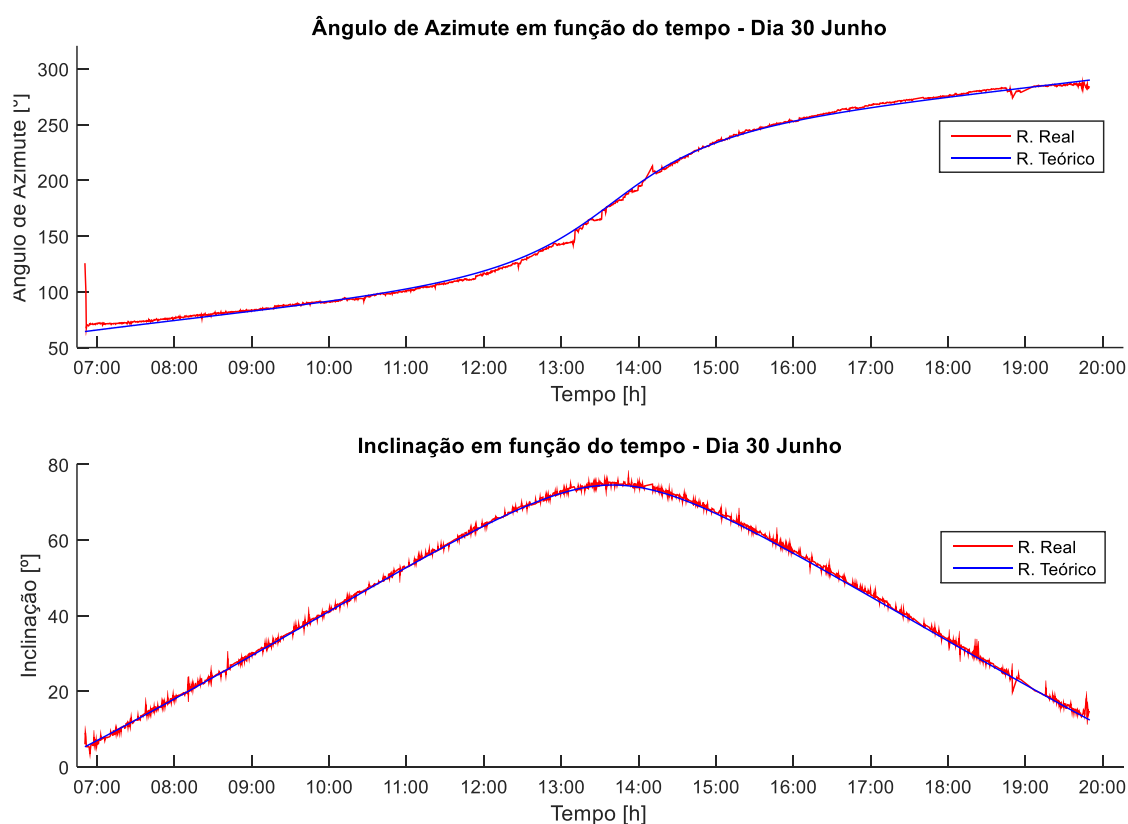


Figura 5.12: Andamento do robô ao longo do dia 30 de junho.

Pode verificar-se que ao longo do dia, os resultados reais e teóricos coincidiriam, com a existência de pequenos desvios e ajustes visíveis em detalhe na Figura 5.13, nomeadamente no gráfico “Desvio absoluto entre curvas em função do tempo”.

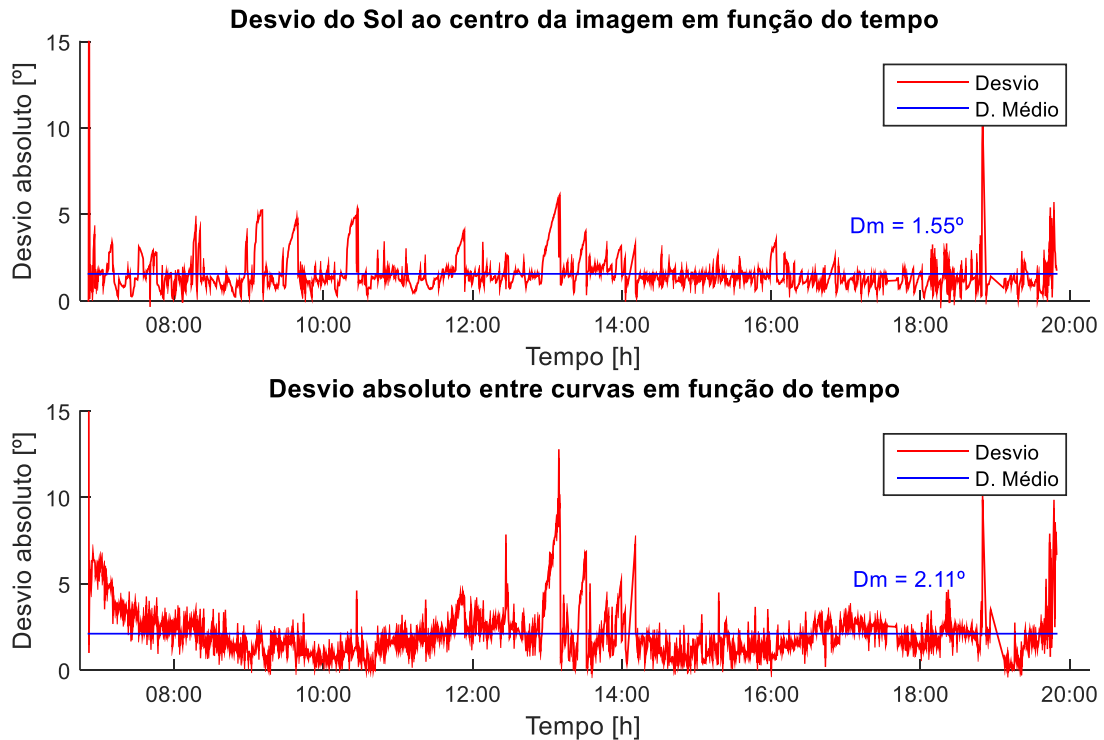


Figura 5.13: Desvio do Sol ao centro da imagem e desvio absoluto entre curva real e teórica, no dia 30 de junho.

Como nota explicativa da Figura 5.13: o gráfico do topo exibe o desvio do Sol ao centro da imagem, resultando da incapacidade de fazer coincidir os vetores solar e normal ao plano frontal da câmara. O que se traduz no erro de seguimento devido a limitações físicas do sistema, como anteriormente mencionado. Com 1.55° de valor médio, encontra-se na mesma ordem de grandeza do erro de seguimento analisado no subcapítulo anterior, cujo valor foi de 1.22°, um pouco superior, devido ao tempo de processamento que advém do tratamento de imagem, refletindo-se no tempo de acção do robô e posteriormente no erro de seguimento em tempo real.

O desvio absoluto entre curvas, que representa a diferença entre a orientação real do robô e a posição teórica do Sol para um dado instante, apresentou um valor médio de 2.11°. Tal fato indica que existe uma defasagem entre a orientação calculada matematicamente e a posição real do Sol. Sendo esta diferença mais acentuada na curva que descreve a componente horizontal da trajetória solar, mais concretamente, nos períodos que sucedem o amanhecer e antecedem o anoitecer. Já a perturbação visível às 13h teve origem no ajuste da orientação do robô de forma a reposicionar o servomotor, dada a limitação referida anteriormente.

Depois de implementado, foi testado o modo de seguimento autónomo com memória, que realizado no dia 28 de julho de 2016 e sob condições de céu limpo, produziu os resultados da Figura 5.14 e Figura 5.15:

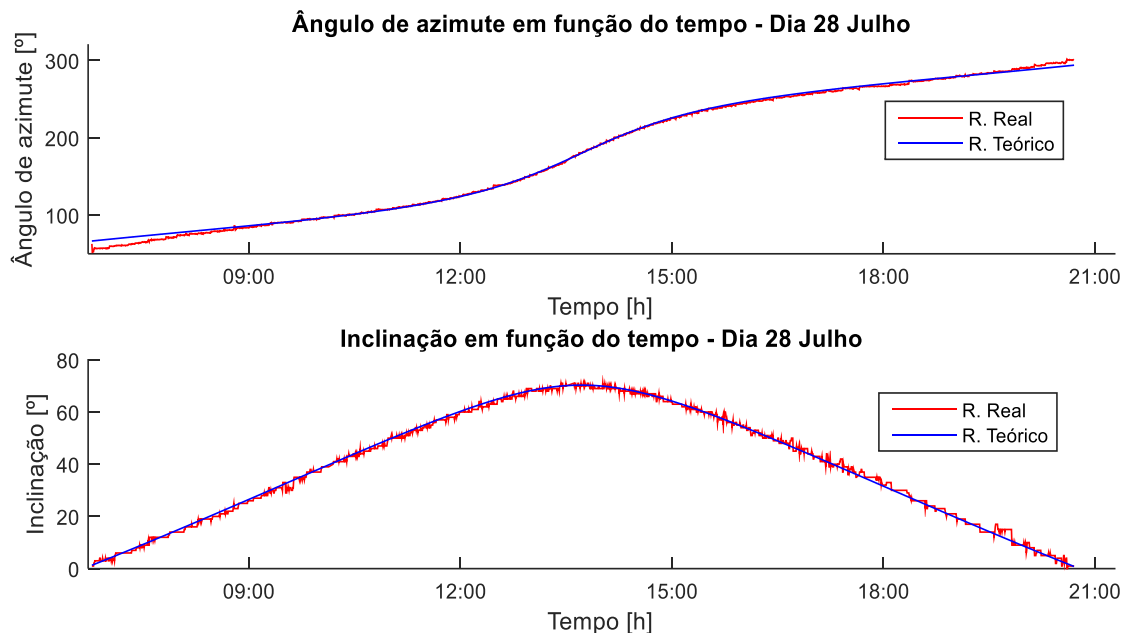


Figura 5.14: Andamento do robô ao longo do dia 28 de julho.

Da Figura 5.14 é possível verificar a correlação entre a curva teórica resultante do modelo da posição aparente do Sol e a curva real deste, obtida pelo sistema. É notória ainda, uma pequena diferença ao início e no fim do dia. O desvio entre curvas encontra-se representado na Figura 5.15, sendo ainda referido o seu valor médio, calculado com base nos valores obtidos ao longo do dia.

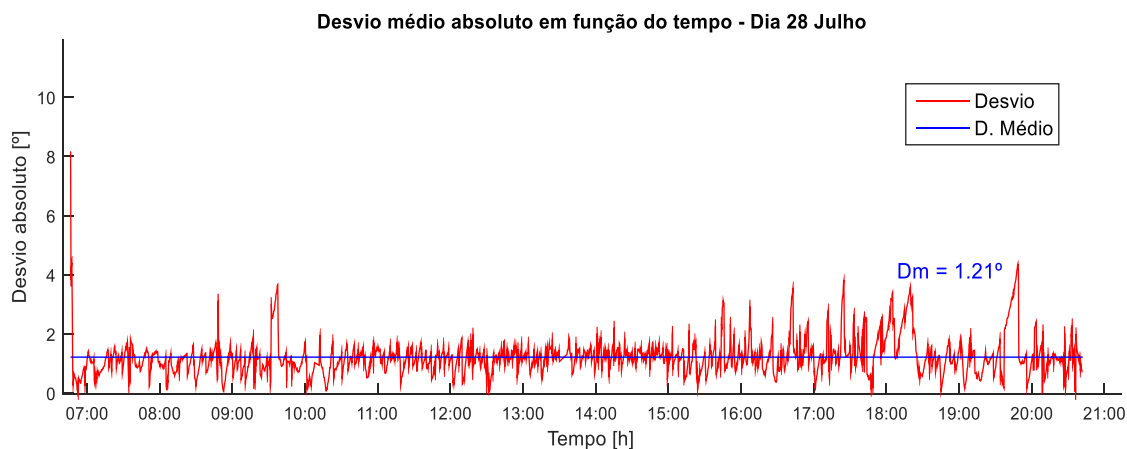


Figura 5.15: Desvio do Sol ao centro da imagem no teste realizado a 28 de julho.

Ao observar a Figura 5.14 e Figura 5.15 é possível evidenciar mais uma vez a desfasagem entre curvas real e teórica, em particular no início de no fim do dia, não sendo muito relevante na redução do rendimento da instalação, pelo fato da irradiância nesses períodos apresentar um valor reduzido. No entanto esta desfasagem existe, correspondendo ao desvio entre curvas, de valor médio 1.22° , calculado para o dia 28 de julho.

Ao analisar os resultados dos dias 30 de junho e 28 de julho de 2016 é possível concluir que a orientação teórica, resultante do modelo matemático da posição aparentado Sol nem sempre coincide com a orientação real do robô e consequentemente do Sol aquando o seguimento através de processamento de imagem. Sendo visível um desvio entre orientações, exemplificado na Figura 5.16 - topo, através do vetor Desvio.

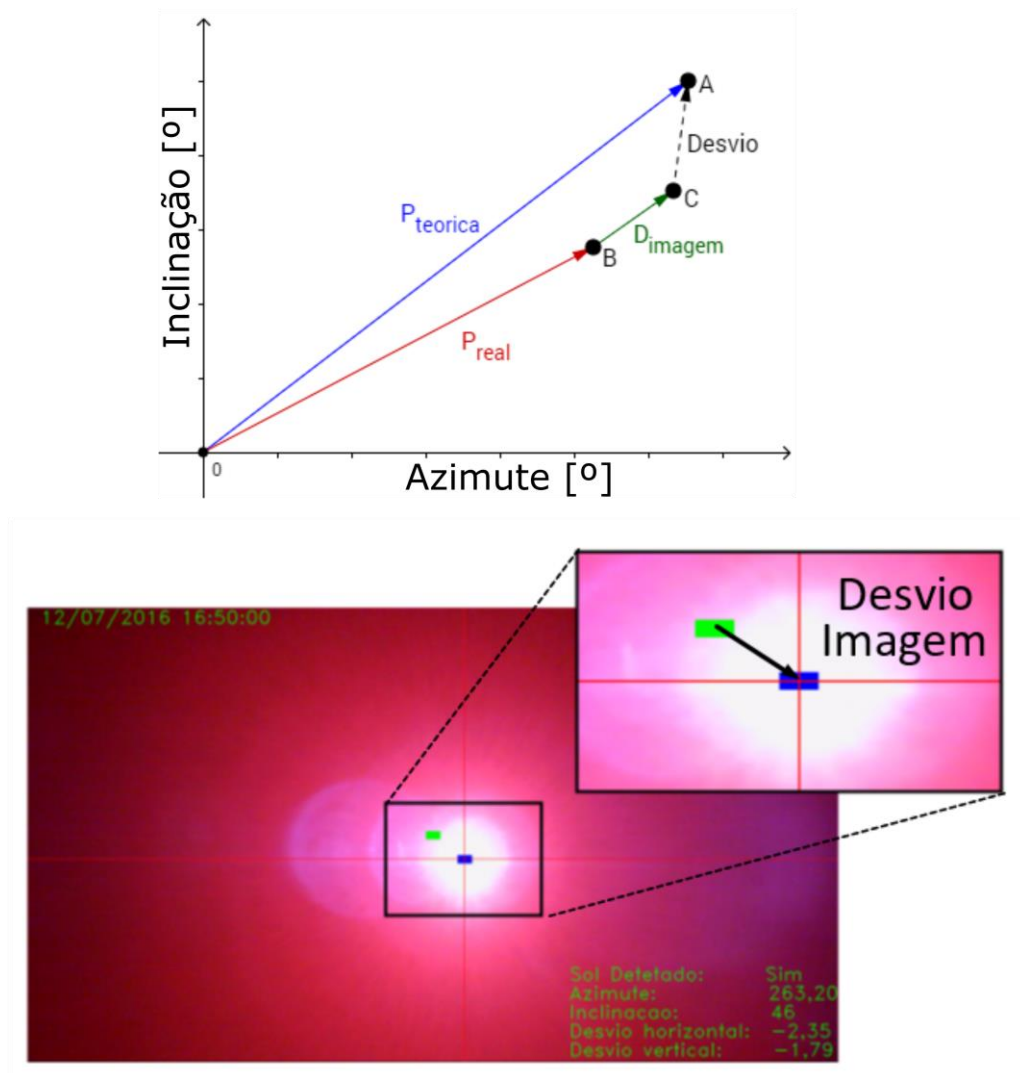


Figura 5.16: Relação entre desvios (topo) e representação do desvio de imagem (baixo).

Considerando que:

- O desvio D_{imagem} , apresentado na Figura 5.16- inferior, se calcula numa primeira fase em píxeis, através da distância euclidiana entre o centro da imagem (ponto verde) e o centro do Sol (ponto azul), sendo posteriormente convertido em graus pela razão encontrada no subcapítulo 5.2;
- A orientação teórica P_{teorica} resulta dos formalismos matemáticos anteriormente explicados e que à orientação real do robô P_{real} lida pela bússola, é feito o ajuste de acordo com o desvio resultante dos cálculos com processamento de imagem D_{imagem} , resultando a orientação real do Sol para esse instante;
- A incerteza associada à medição da orientação do robô através da bússola, de resolução 0.1° (azimute) e 1° (inclinação);
- O modelo matemático para o cálculo da posição aparente do Sol, testado pelo NREL⁸, apresenta desvios médios de 0.22° e 0.4° no ângulo de azimute e inclinação, respetivamente (Rizvi et al. 2014).

Obtém-se o desvio entre vetores teórico e real resultante, que permite evidenciar a diferença da previsão teórica face à orientação real do Sol, notória em certas partes do dia. Diferença esta que poderá influenciar a produção global do sistema, pois sabendo que os painéis deverão estar corretamente alinhados com o vetor solar: um desvio superior ao ângulo de aceitação do coletor solar, reduzirá o rendimento deste, e por consequente, o aproveitamento do sistema a nível global.

Comparação entre métodos de seguimento

Como visto anteriormente, os dois modos de funcionamento apresentam um desvio médio diário semelhante, sendo notória uma redução de ruído no modo autónomo com memória (dia 28 de julho). Advindo da limitação de movimento por parte do sistema de controlo, permitindo apenas movimentos de andamento semelhante aos anteriores. Exemplos de fontes de ruído são os fenómenos de reflexão em transportes aéreos e de refração nas nuvens.

Os fenómenos de refração ocorridos pelo movimento das nuvens fazem com que surja um gradiente luminoso, o qual se desloca com a própria nuvem. Assim, a passagem dos raios solares pela zona menos densa da nuvem provoca uma perturbação no sistema, pois este admite que o

⁸ Laboratório Nacional de Energia Renovável: laboratório localizado na cidade de Golden, Colorado, e que pertence ao Departamento de Energia dos Estados Unidos.

foco com maior intensidade luminosa corresponde ao Sol (apresentando o andamento da nuvem). Comportamento errático, uma vez que o Sol permanece quase estático, quando comparado ao movimento das nuvens.

Para evidenciar a melhoria na redução de ruído do modo autónomo com memória face ao modo sem memória, foi realizado um teste no dia 22 de julho (dia parcialmente nublado), do qual decorreram os resultados da Figura 5.17.

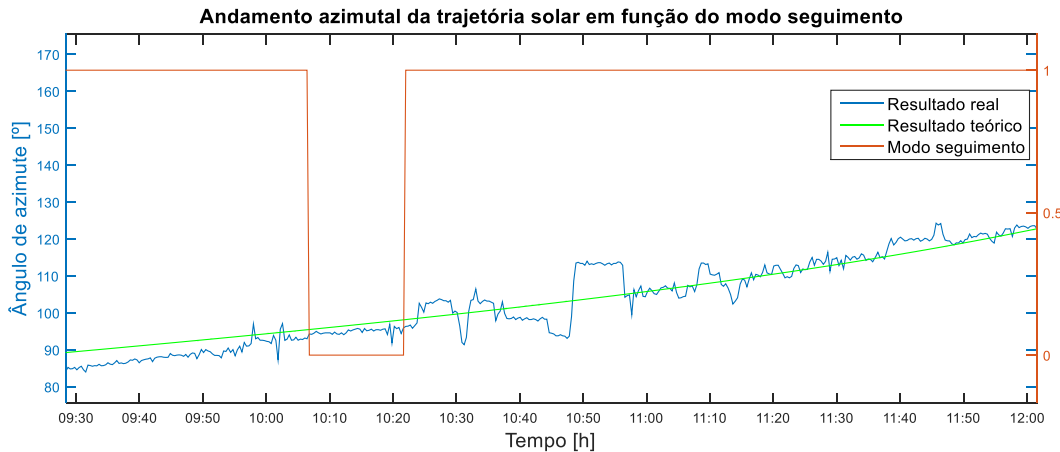


Figura 5.17: Acompanhamento da trajetória solar em função do modo de seguimento.

Notando que ao modo autónomo com memória corresponde o valor numérico 0 e ao modo sem memória corresponde o valor 1, é possível verificar uma maior consistência⁹ de seguimento utilizando o modo com memória. Em contrapartida, a utilização do modo sem memória resulta num acompanhamento de todos os focos luminosos, seguindo as nuvens retro iluminadas, voltando posteriormente à posição correspondente ao Sol, aquando o seu surgimento na imagem sob a forma de radiação direta. Comportamento visível nos picos distantes da linha verde/teórica.

Comparação com os sistemas referidos na literatura

Se se tomar de exemplo uma instalação fotovoltaica de concentração em que são usados concentradores compostos por lentes de Fresnel com um fator de concentração $C_{\max} \geq 650$, pela equação 2.1, conhecendo o índice de refração do vidro usado na lente $n = 1.5$ (Fresnel Technologies Inc 2011), tem-se um ângulo de aceitação: $\theta \leq 3.37^\circ$.

⁹ Exatidão de seguimento, de forma aproximada ao resultado teórico (linha verde).

Segundo a literatura o seguimento baseado em eletrônica fotossensível apresenta um erro associado de 2°, desenvolvido pela empresa Girasolar (Mousazadeh et al. 2009) a 6° (Peterson et al. 2005), dependendo da estratégia e dos sensores utilizados. Já o seguimento através do modelo matemático para o cálculo da posição aparente do Sol apresenta um erro médio de 0.45° (Rizvi et al. 2014), sendo superior em certos momentos do dia.

Pelo fato do sistema implementado utilizar o modelo matemático anteriormente referido, conjugando-o com o processamento de imagem para ajuste dos seus valores, melhorando a precisão do seguimento, torna-se uma solução mais precisa que as soluções com recurso a eletrônica fotossensível. Esta solução garante ainda um erro de seguimento muito inferior ao ângulo de aceitação necessário ao sistema CPV tomado de exemplo.

Contudo, apesar do seu consumo unitário ser superior, dada a sua precisão e substituindo vários sensores ao longo da instalação, torna-se uma solução viável pela necessidade de apenas um sistema deste género em todo o parque.

Conclusões

Ao longo desta dissertação foi apresentado um sistema de seguimento solar com o intuito de adquirir a orientação do Sol em tempo real, tendo como finalidade a implementação numa instalação fotovoltaica de concentração. O sistema desenvolvido teve de obedecer a alguns requisitos como a elevada precisão de seguimento e um tempo de resposta reduzido.

Com o intuito de cumprir os requisitos, a estrutura do sistema de seguimento teve por base um robô de dois eixos de rotação, equipado com GPS, bússola e uma câmara para aquisição de dados. Como metodologia de seguimento foram adotadas duas estratégias distintas: uma baseada num modelo matemático que descreve a trajetória aparente do Sol e outra na identificação deste através da captação de imagens em tempo real. A conjugação destas duas estratégias resultou num método de seguimento híbrido capaz de acompanhar a trajetória solar com a precisão requerida. O sistema desenvolvido tem como funcionalidade a disponibilização da orientação do vetor solar aos restantes seguidores presentes no parque.

Concluída a implementação, chegou o momento de analisar o desempenho do sistema elaborado, resultando as seguintes conclusões.

6.1 Considerações Finais

Como o sistema se baseia em dois modos de seguimento (autónomo com e sem memória), sendo híbridos, pelo fato de conjugarem estratégias de controlo em anel aberto e em anel fechado: é chegado o momento de refletir sobre estas estratégias.

- Anel aberto – Modelo matemático para cálculo da posição aparente do Sol: permite encontrar a orientação do vetor solar de forma rápida e económica, uma vez que prescinde de sensores para identificação da origem dos raios solares, sendo o cálculo realizado de forma célere e precisa. Apresentando, no entanto, um pequeno desvio em certos períodos do dia.
- Anel fechado – Identificação do Sol através de processamento de imagem: dependendo da resolução da câmara e da bússola instaladas, permite uma encontrar a orientação do vetor solar com elevada precisão, apresentando como menos valia um consumo mais elevado face à estratégia de controlo em anel aberto, sendo esta resultante do consumo dos sensores e do consumo inerente ao processamento de imagem.

A implementação de um sistema de controlo híbrido permitiu unificar as mais valias das duas estratégias, garantindo a precisão requerida pelos sistemas CPV. Pelo que os modos de seguimento autónomo utilizam o processamento de imagem sempre que o Sol esteja disponível (dada a sua precisão de seguimento), utilizando o modelo matemático na ausência deste, permitindo prever o andamento espectável do Sol (para que, quando o Sol surgir de novo na imagem, o robô se encontre corretamente alinhado com este).

Dadas as limitações físicas da estrutura, o sistema apresenta um erro de seguimento (físico) associado de 1.2° , sensivelmente. Contudo, apesar desta limitação, é possível saber a orientação real do Sol, contabilizando para isso, o desvio entre este e o centro da imagem adquirida, disponibilizando corretamente a posição aparente do Sol.

Os testes realizados para análise ao desempenho do sistema permitiram ainda concluir que apesar da sua elevada precisão, o modelo matemático nem sempre traduz a orientação real do vetor solar. Sendo o ajuste desta efetuado pela identificação do Sol através de processamento de imagem, usando técnicas de controlo em anel fechado. De referir que a orientação encontrada contém associada uma incerteza, resultante da resolução dos aparelhos de medida. Todavia, apesar desta incerteza, a precisão dos resultados produzidos cumpre os requisitos das instalações CPV.

Em suma, a implementação deste tipo de sistemas permite a redução da energia despendida na deteção do vetor solar, aumentando a produção global das instalações onde se encontram inseridos. Uma vez que, se utiliza apenas um sistema para deteção da orientação dos raios solares em todo o parque, ao invés de um sistema de deteção por seguidor ou fila de seguidores.

6.2 Trabalho Futuro

Com base nos resultados experimentais ao sistema implementado, são notórias algumas otimizações quer a nível de *hardware*, nos sensores aplicados na estrutura do robô; como a nível de *software*, dando enfoque aos algoritmos de controlo. Tais otimizações permitirão um aumento da precisão do seguimento.

A nível da estrutura, é possível aumentar a precisão do sistema usando motores de passo (*Stepper motors*), pois apresentam um elevado desempenho em termos de precisão. Ao utilizar este tipo de motores ao invés de servomotores, seria possível colmatar dois aspetos menos eficientes do sistema atual, como a precisão de seguimento com um passo de 1° e a incapacidade de seguimento horizontal, uma vez que o servomotor possui um alcance de aproximadamente 180°, notoriamente insuficiente em termos de seguimento do ângulo de azimute. Um segundo aspeto que aumentaria a precisão do sistema de seguimento, seria a utilização de uma bússola com maior resolução dos ângulos de inclinação (*pitch* e *roll*), uma vez que a atual apresenta uma resolução de 1°, sendo pouco precisa para implementação em sistemas fotovoltaicos de concentração.

A substituição do filtro aplicado na câmara por outro semelhante, mas mais rigoroso, permitindo a passagem do feixe mais intenso e retendo os focos menos intensos, resultantes de efeitos de reflexão e refração em nuvens e transportes aéreos: permitiria um aumento da eficiência do módulo de seguimento com base em processamento de imagem, uma vez que a imagem captada seria mais nítida, apresentando contornos mais definidos nas extremidades do foco luminoso.

Por fim, com vista na otimização energética: a utilização de um microcomputador com capacidade de processamento suficiente às necessidades do sistema, permitiria uma redução substancial do consumo energético. Pois este tipo de computadores apresenta um baixo consumo quando equiparados aos restantes de uso regular.

Referências

- Abdallah, S. & Nijmeh, S., 2004. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), pp.1931–1939.
- Al-Mohamad, A., 2004. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy*, 79(3), pp.345–354.
- António Joyce, 2010. Energia PV com concentração (CPV): tecnologias e perspectivas. Energia 2020 - Um objectivo a 10 anos. In Lisboa. Disponível em: http://www.mitportugal.org/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=464&Itemid=1.
- Arbab, H., Jazi, B. & Rezagholizadeh, M., 2009. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow. *Renewable Energy*, 34(4), pp.1114–1118.
- Bigas, M. et al., 2006. Review of CMOS image sensors. *Microelectronics Journal*, 37(5), pp.433–451.
- Bingöl, O., Altintas, A. & Öner, Y., 2006. Microcontroller Based Solar-Tracking System and Its Implementation. *Journal of Engineering Sciences*, 12(2), pp.243–248.
- Blanco-Muriel, M. et al., 2001. Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), pp.431–441.
- Chong, K. & Wong, C., 2010. Open-loop azimuth-elevation sun-tracking system using on-axis general sun-tracking formula for achieving tracking accuracy of below 1 mrad. *Photovoltaic Specialists Conference*, pp.3019–3024.
- Cooper, P., 1969. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12, pp.333–346.
- Fresnel Technologies Inc, 2011. High quality fresnel lenses in a variety of sizes & focal lengths. Disponível em: <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>.
- Georgia Satate University, 2015. The Ecliptic. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/eclip.html>.
- Green, M.A., 2003. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Springer.
- Haiyan, Z., 2009. Research and practice of a fisheye image based approach for solar orientation recognition. pp.1–4.

- Hillebrand, M., Stevanovic, N. & Hosticka, B., 2000. High speed camera system using a CMOS image sensor. *Symposium, 2000. IV*
- Instituto Camões, 2006. Ciência em Portugal - Dicionário. Disponível em: <http://cvc.instituto-camoes.pt/ciencia/d90.html> [Acedido em Janeiro, 2016].
- Jinayim, T. et al., 2007. Highly Efficient Low Power Consumption Tracking Solar Cells for White LED-Based Lighting System. *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 1(4), pp.291–296.
- Masters, G., 2013. *Renewable and efficient electric power systems* Second edi. J. W. & Sons, ed.,
- Michalsky, J., 1988. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar energy*, 40(3), pp.227–235.
- Miloudi, L., Acheli, D. & Chaib, A., 2013. Solar tracking with photovoltaic panel. *Energy Procedia*, 42(1), pp.103–112.
- Morais, J.L., 2009. *Sistemas Fotovoltaicos, da Teoria à Prática*, Portugal: PUBLINDUSTRIA.
- Mousazadeh, H. et al., 2009. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), pp.1800–1818.
- Oliveira, M.F. De, 2013. Consumo energético Mundial – O petróleo no cabaz energético do futuro. In *Conferência Indústria Petrolífera: Realidade e Desafios*. Galp Energia. Disponível em: <http://www.apetro.pt/documentos/Galp.pdf>. [Acedido em Janeiro, 2016]
- Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray level histograms. *Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 9(1), pp.62–66.
- Peterson, T., Rice, J. & Valane, J., 2005. Solar tracker. *Final Project Report, Cornell*
- Pitman, C.L. & Vant-Hull, L.L., 1978. Sun and their effect on solar intensity predictions. *Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*, Denver, 28, pp.701–706.
- Rizvi, A.A. et al., 2014. Sun position algorithm for sun tracking applications. *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.5595–5598.
- Schombert, J., 2011. Earth Coordinate System. Disponível em: <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec03.html> [Acedido em Janeiro, 2016].
- Sea and Sky, 1998. Glossary of Astronomy Terms - Astronomy Reference Guide on Sea and Sky. Disponível em: <http://www.seasky.org/astronomy/astronomy-glossary.html> [Acedido em Janeiro, 2016].
- Silva, J.C., 2011. *Manual Tratamento Resultados Experimentais*, Disponível em: Manual Tratamento Resultados Experimentais.pdf.
- Spencer, J., 1989. Comments on The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050). *Solar Energy*, 42(4), p.353. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1989SoEn...42..353S>.
- Swift, L.W., 1976. Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resources Research*,

12, pp.108–112.

Walraven, R., 1978. Calculating the position of the sun. *Solar Energy*, 20, pp.393–397.

Wang, X., Wang, J. & Zhang, C., 2006. Research of an Omnibearing Sun Locating Method with Fisheye Picture Based on Transform Domain Algorithm 2 A Fast Judge Algorithm of the Brightest Point in Picture Based. , Springer-V, pp.1169–1174.

Características dos sensores implementados

WebCam ODRIOD 720P

- Compatible with ODROID U3/U2/XU/XU+E/XU3/XU3-Lite/C1/XU4/C0/C2 with the latest OS version.
- Only Image Preview and Video call are possible in Android platform.
- Real 720P HD resolution, 16:9 wide screen output
- USB2.0 High-speed and plug-n-play interface (UVC)
- CMOS sensor, 1.0Megapixel (1280 * 720 HD resolution)
- Built-in UAC(USB Audio Class) microphone. Work with only Linux and Android 4.2.2(higher)
- UP to 30fps
- SONIX SN9C259 USB image controller
- Novatek NY99140 image sensor
- Rating: DC 5V/500mA
- AOV: 65 degree
- FOV: 68 degree (pi 5.2mm)

UBX-G7020

u-blox 7 GNSS chips

Standard Professional Automotive

POSITIONING

Highlights

- GNSS engine for GPS/QZSS, GLONASS
- Minimal board space, <30 mm²
- Combines low power consumption and high sensitivity
- Minimal e-BOM, as few as 8 external parts
- Exceptional jamming immunity
- Pin-compatible to UBX-M8030



UBX-G7020-CT 3.0 x 3.4 x 0.36 mm UBX-G7020-KT 5.0 x 5.0 x 0.59 mm UBX-G7020-KA 5.0 x 5.0 x 0.59 mm

Product description

The high performance UBX-G7020 multi-GNSS chip supports GPS, GLONASS, QZSS and SBAS. It delivers exceptional sensitivity and acquisition times.

u-blox 7 features ultra low power consumption, thanks to innovative single die architecture and enhanced software algorithms. This gives the UBX-G7020 best in class power consumption for GLONASS reception.

The extended voltage supply range and 1.8 V and 3.0 V I/O compliance supports a wide variety of user applications. Sophisticated RF-architecture and interference suppression using active continuous wave detection ensure maximum performance even in GNSS-hostile environments.

The UBX-G7020 is available in your choice of miniature WL-CSP and QFN packages and features an ultra small solution footprint of only 30 mm². The built-in LNA, LDOs and DC/DC converter, and on-chip ROM mean that only the smallest possible external BOM is required. By supporting TCXOs or lower price GNSS oscillators the UBX-G7020 further ensures a minimal Total-Cost-of-Ownership.

The ultra small UBX-G7020-CT is the perfect choice for portable consumer applications with demanding size and cost constraints. With its rigorous Automotive quality and manufacturing standards (AEC-Q100, ISO/TS 16949) the UBX-G7020-KA is ideal for automotive applications.

Product selector

Model	Package	Type	Supply	Interfaces	Features	Grade
	Package	GPS / QZSS GLONASS Galileo BeiDou Timing Dead Reckoning Precise Point Positioning Raw Data	1.4 V – 3.6 V	UART USB SPI DDC (I ² C compliant)	Programmable (Flash) Data logging RTC crystal Internal oscillator Antenna supply and supervisor	Standard Professional Automotive
UBX-G7020-CT	WL-CSP50	• •	•	• • • •	S S S C/T S	
UBX-G7020-KT/KA	QFN40	• •	•	• • • •	S S S C/T S	

C/T = Crystal and TCXO supported

S = supported, may require external components

Features

Receiver type	56-channel u-blox 7 engine GPS & QZSS L1 C/A, GLONASS L1OF, SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS		
Navigation update rate	up to 10 Hz		
Accuracy	GPS	2.5 m CEP	4 m CEP
	SBAS	2.0 m CEP	
Acquisition	Cold starts:	29 s	30 s
	Hot starts:	1 s	3 s
Sensitivity	Tracking:	-162 dBm	-158 dBm
	Cold starts:	-148 dBm	-140 dBm
	Reacquisition:	-160 dBm	-156 dBm
Assistance	AssistNow Online AssistNow Offline AssistNow Autonomous OMA SUPL & 3GPP compliant		
LNA	Built-In		
Oscillator	Crystal or TCXO		
RTC input	32.768 kHz (optional). Real time clock can be derived from GPS crystal or TCXO.		
Antenna Supervision	Short and open circuit detection supported with external circuit		
DC/DC converter	Integrated		
Anti jamming	Active CW detection and removal		
Memory	Optional SQL Flash		
Data logger*	Continuous log of position, velocity & time		

* External FLASH required.

Electrical data

Supply voltage	1.4 V to 3.6 V
Digital I/O voltage level	1.65 – 3.6 V
Power Consumption	41 mW @ 1.4 V (Continuous) 9 mW @ 1.4 V Power Save mode (1 Hz)
Backup Supply	1.4 to 3.6 V

Interfaces

Serial interfaces	1 UART 1 USB 1 DDC (I ² C compliant) 1 SPI
Digital I/O	2 configurable time pulses 2 EXTINT interrupt inputs 2 GPIO for antenna supervision
Memory	SQL interface

Legal Notice

u-blox reserves all rights to this document and the information contained herein. Products, names, logos and designs described herein may in whole or in part be subject to intellectual property rights. Reproduction, use, modification or disclosure to third parties of this document or any part thereof without the express permission of u-blox is strictly prohibited.

The information contained herein is provided "as is". No warranty of any kind, either express or implied, is made in relation to the accuracy, reliability, fitness for a particular purpose or content of this document. This document may be revised by u-blox at any time. For most recent documents, please visit www.u-blox.com.

Copyright © 2015, u-blox AG

Packages

UBX-G7020-CT:	50 Pin WL-CSP, 3.4 x 3.0 x 0.36 mm 11.9 mg
UBX-G7020-KT/KA:	40 Pin MLF/QFN, 5.0 x 5.0 x 0.59 mm 75 mg

Environmental data

Operating temp.	-40°C to 85°C
Storage temp.	-40°C to 125°C
Humidity	JEDEC MSL 1
RoHS compliant (lead-free) and green (no halogens)	

Support products

u-blox 7 Evaluation Kits:

Easy-to-use kits to get familiar with u-blox 7 positioning technology, evaluate functionality, and visualize GNSS performance.

EVK-7N:	u-blox 7 GNSS Evaluation Kit, with TCXO, supports u-blox 7 chips
EVK-7C:	u-blox 7 GNSS Evaluation Kit, with Crystal, supports u-blox 7 chips

Product variants

UBX-G7020-CT	u-blox 7 GNSS chip, 50 Pin WL-CSP
UBX-G7020-KT/KA	u-blox 7 GNSS chip, 40 Pin QFN

Further information

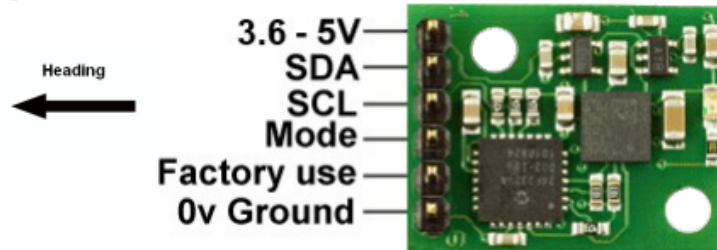
For contact information, see www.u-blox.com/contact-us.

For more product details and ordering information, see the product data sheet.

CMPS10 - Tilt Compensated Compass Module

I2C mode

Connections



To enter the I2C mode of operation leave the mode pin unconnected

I2C Communication

I2C communication protocol with the compass module is the same as popular eeprom's such as the 24C04. First send a start bit, the module address with the read/write bit low, then the register number you wish to read. This is followed by a repeated start and the module address again with the read/write bit high. You now read one or two bytes for 8bit or 16bit registers respectively. 16bit registers are read high byte first. The compass has a 23 byte array of registers. organized as below:

Register	Function
0	Software version
1	Compass Bearing as a byte, i.e. 0-255 for a full circle
2,3	Compass Bearing as a word, i.e. 0-3599 for a full circle, representing 0-359.9 degrees.
4	Pitch angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane
5	Roll angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane
6	Unused
7	Unused
8	Unused
9	Unused
10,11	Magnetometer X axis raw output, 16 bit signed integer with register 10 being the upper 8 bits
12,13	Magnetometer Y axis raw output, 16 bit signed integer with register 12 being the upper 8 bits
14,15	Magnetometer Z axis raw output, 16 bit signed integer with register 14 being the upper 8 bits
16,17	Accelerometer X axis raw output, 16 bit signed integer with register 16 being the upper 8 bits
18,19	Accelerometer Y axis raw output, 16 bit signed integer with register 18 being the upper 8 bits
20,21	Accelerometer Z axis raw output, 16 bit signed integer with register 20 being the upper 8 bits
22	Command register

Register 1 is the bearing converted to a 0-255 value. This may be easier for some applications than 0-3599 which requires two bytes. For those who require better resolution registers 2 and 3 (high byte first) form a 16 bit unsigned integer in the range 0-3599. This represents 0-359.9°. Register 4 is the pitch angle, giving an angle of 0 when the board is flat and up to +/- 85° at maximum tilt in either direction. Register 5 works the same way but with results for the Roll angle. There is then an array of registers (10-21) providing all the raw sensor data from the magnetic and acceleration sensors. Finally Register 22 is the command register and is used to calibrate the compass, change address and if necessary restore the factory default calibration.

Calibration the CMPS10

I would recommend evaluating the CMPS10 performance first before implementing this function. Its purpose is to remove offsets caused by constant magnetic sources around the CMPS10. First of all you need to determine North and align the CMPS10 with it, then enter the calibration mode by writing 0xF0 to the command register (22). To calibrate the first point write 0xF5 to the command register, this should also light the LED, then move the object through 90° and write 0xF5 to the command register. Repeat this twice more so four points are calibrated and the LED should also turn off to confirm calibration completion. Please make sure that the CMPS10 is not located near to ferrous objects as this will distort the magnetic field and induce errors in the reading.

Restoring Factory Calibration

Should you need to revert to the factory calibration then write the following to the command register in 3 separate transactions with 100ms between each transaction: 0x20,0x2A,0x60. These commands must be sent in the correct sequence to restore the calibration, additionally, No other command may be issued in the middle of the sequence. The sequence must be sent to the command register at location 22, which means 3 separate write transactions on the I2C bus. (A write transaction is [start sequence] [I2C address] [register address] [command byte] [stop sequence] then a 100mS delay).

Changing the I2C Bus Address

To change the I2C address of the CMPS10 you must have only one module on the bus. Write the 3 sequence commands in the correct order followed by the address with 100ms between writes. Example; to change the address of a compass currently at 0xC0 (the default shipped address) to 0xC2, write the following to address 0xC0; (0xA0, 0xAA, 0xA5, 0xC2) with a 100ms delay after each of the first three bytes. These commands must be sent in the correct sequence to change the I2C address, additionally, No other command may be issued in the middle of the sequence. The sequence must be sent to the command register at location 22, which means 4 separate write transactions on the I2C bus. When done, you should label the CMPS10 with its address, however if you do forget, just power it up without sending any commands. The CMPS10 will flash its address out on the LED. One long flash followed by a number of shorter flashes indicating its address. The flashing is terminated immediately on sending a command the CMPS10.

Address		Long Flash	Short flashes
Decimal	Hex		
192	C0	1	0
194	C2	1	1
196	C4	1	2
198	C6	1	3
200	C8	1	4
202	CA	1	5
204	CC	1	6
206	CE	1	7

Take care not to set more than one device to the same address, there will be a bus collision and very unpredictable results.

4-Axis Servos Control Palletizing Robot Arm Model

Features:

- Simulate real palletizing robot arm structure
- PVC material, CNC processing
- Adopts MG995 55g metal gear servo 3pcs
- Active joint bearing connection

MG995 55g Servo Specifications:

- Size: 40.7*19.7*42.9mm
- Working torque: 13kg/cm
- Respond rotation speed: 53-62R/M
- Working temperature: -30~+60 C
- Plug: JR, Tutaba
- Rotation angle: 180 degree
- Analog servo
- Working current: 100mA
- Working voltage: 3-7.2V
- Metal gear, coreless motor, two ball bearing
- Operation speed: 0.17s/60degree(4.8V); 0.13S/60degree(6.0V)

SG90 9G servo specifications:

- Size: 23*12.2*29mm
- Weight: 9g
- Working torque: 1.6kg/cm
- Respond rotation speed: 0.12-0.13s/60degree
- Working temperature: -30~+60 C
- Plug: JR, Futaba
- Rotation angle: 180 degree
- Analog servo
- Working current: 100mA
- Working voltage: 3.5-6V
- Metal gear